



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

AKTIVNÍ AERODYNAMICKÉ PRVKY OSOBNÍCH VOZIDEL

ACTIVE AERODYNAMIC COMPONENTS OF ROAD VEHICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dana Stiborová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vančura, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka: **Bc. Dana Stiborová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vančura, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aktivní aerodynamické prvky osobních vozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvoření reálného prototypu aktivního kanálu chlazení brzd a jeho regulace integrované do CAN sběrnice vozidla. Práce dále obsahuje konstrukční návrh aero–aktivní regulace přítlaču na zadní nápravě vozidla.

Cíle diplomové práce:

Vytvořit CAD návrh aktivního brzdového kanálu.
Navrhnout řídicí algoritmus pro běžně dostupný programovatelný hardware.
Experimentálně ověřit přínos aktivního kanálu.
Provést konstrukční návrh aero–aktivní regulace přítlaču na zadní nápravě vozidla.

Seznam doporučené literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4th edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.

GILLESPIE, Thomas. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav a KUBÁT, Jindřich. Automobily (5): Elektrotechnika motorových vozidel I. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. 259 s. ISBN 978-80-87143-05-6.

JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav a KUBÁT, Jindřich. Automobily (6): Elektrotechnika motorových vozidel II. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. 259 s. ISBN 978-80-87143-14-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh aktivních aerodynamických prvků, konkrétně uzavíratelného kanálu pro přívod chladicího vzduchu k brzdám a automobilového křídla s proměnnou polohou naklopení. V rámci diplomové práce bylo vytvořeno prototypové řešení chladicího kanálu a také řídicí software a hardware aktivní regulace. Parametry kanálu byly změřeny při silničním testu. Dále byl vytvořen konstrukční návrh aktivního automobilového křídla včetně funkce aktivní regulace a byl určen vliv křídla na aerodynamické parametry automobilu.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika, aktivní aerodynamické prvky, kanál chlazení brzd, automobilové křídlo, sběrnice CAN, Arduino

ABSTRACT

In this diploma thesis active aerodynamic components are designed, specifically brake cooling duct and active automotive wing. Cooling duct prototype and also active regulation controlling electronics including the software were created. Road test was performed to measure the duct parameters. Construction design and the active regulation function of the automotive wing were created. The influence of the wing on aerodynamic characteristics of the car was determined.

KEYWORDS

aerodynamics, active aerodynamics, brake cooling channel, automotive wing, CAN bus, Arduino

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STIBOROVÁ, D. *Aktivní aerodynamické prvky osobních vozidel*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 136 s. Vedoucí diplomové práce Jan Vančura.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vančury, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Dana Stiborová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Vančurovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky a také za cenný čas věnovaný přípravě a realizaci měření. Poděkovat bych chtěla také panu Ing. Ondřeji Blatňákovi, Ph.D. za pomoc při samotném měření a panu Ing. Ondřeji Čavojovi za provedené CFD výpočty. Dále také společnosti Škoda Auto a.s. a oddělení EBW za poskytnutí nezbytných datových podkladů.

Ráda bych poděkovala své rodině za projevenou podporu po celou dobu mého studia.

Nakonec bych chtěla poděkovat svému příteli za stálou podporu a pochopení.

OBSAH

Úvod	10
1 Teorie.....	11
1.1 Úvod do aerodynamiky.....	11
1.2 Silové účinky proudu vzduchu na vozidlo.....	13
1.3 Vliv aerodynamických sil na parametry vozu	19
1.4 Vliv jednotlivých částí karosérie na aerodynamiku vozu	23
1.5 Aktivní aerodynamické prvky.....	29
1.6 Zadní (zadřový) spojler	35
1.7 Kanál chlazení brzd	48
1.8 Určení hodnot aerodynamických parametrů	52
2 Návrh aktivního brzdového kanálu	59
2.1 Sériový kanál versus prototypový kanál	59
2.2 Konstrukční řešení	61
2.3 Výroba kanálu.....	68
2.4 Montáž kanálu na testovací vozidlo.....	68
3 Aktivní regulace brzdového kanálu	72
3.1 Princip řízení aktivní regulace	72
3.2 Řídicí elektronický obvod.....	72
3.3 Přijímání zpráv ze sběrnice CAN	76
3.4 Řídicí algoritmus.....	77
3.5 Výroba řídicího elektronického obvodu	81
3.6 Testování řídicího systému	82
4 Experimentální ověření přínosu kanálu	84
4.1 Příprava měření.....	84
4.2 Průběh měření	87
4.3 Vyhodnocení měření.....	88
5 Aktivní aerodynamické křídlo	100
5.1 Volba profilu křídla	100
5.2 Konstrukční návrh křídla	104
5.3 Výpočet aerodynamických parametrů	105
5.4 Přepočít aerodynamického zatížení.....	114
5.5 Ovládací mechanismus	114
5.6 Návrh stojny.....	117
5.7 Sestava aktivního křídla.....	121
5.8 Aktivní regulace.....	123

Závěr	124
Seznam použitých zkratek a symbolů	132
Seznam příloh	136

ÚVOD

Se vzrůstajícím počtem provozovaných motorových vozidel a zmenšujícími se zásobami fosilních paliv je v dnešní době snahou snižovat spotřebu paliva osobních automobilů. Snižování spotřeby paliva vede také ke snížení produkce škodlivých emisí. Právě na emisní parametry vozidel je dnes kladen hlavní důraz a stále se zpřísnující emisní zákony nabádají výrobce automobilů k hledání nových cest, jak spotřebu paliva snížit. Na spotřebu automobilu má vliv velké množství faktorů. Jedním z nich je i aerodynamický odpor vozidla.

Moderní automobily jsou již od základu navrhovány s ohledem na minimalizaci aerodynamického odporu. Ovšem některé prvky, které jsou pro správnou funkci automobilu nezbytné, generují aerodynamický odpor z principu své funkce. Jedná se například o kanál pro přívod chladicího vzduchu k brzdám přední nápravy automobilu. Brzdy ovšem není nutno chladit za všech okolností a tak je možno v určitých režimech jízdy kanál uzavřít a tím snížit tuto složku celkového aerodynamického odporu, což má za následek i snížení spotřeby paliva. Z tohoto důvodu vznikají aktivní aerodynamické prvky, které umožňují měnit aerodynamické parametry vozidla při jízdě.

Cílem této práce je nahnout, vytvořit a otestovat aktivní aerodynamický kanál přivádějící chladicí vzduch k brzdám, který bude automaticky uzavírán pomocí informací přicházejících ze sběrnice CAN automobilu.

Aerodynamické síly mají vliv také na stabilitu vozu a to především ve vysokých rychlostech. Aktivní aerodynamické prvky mohou v závislosti na režimu jízdy upravovat tyto síly, aby automobil zůstal maximálně stabilní v každé jízdě situaci.

Dalším cílem této práce bylo vytvořit aktivní zadní spojler, který vytváří přítlačnou sílu na zadní nápravě a umožňuje zadním kolům přenést na vozovku větší hnací či brzdou sílu. Zadní spojler může být využit jako aerodynamická brzda, která zkracuje brzdou dráhu vozidla, čímž přispívá ke zvýšení bezpečnosti provozu.

1 TEORIE

1.1 ÚVOD DO AERODYNAMIKY

Aerodynamika je oblast fyziky, přesněji mechaniky tekutin, která se zabývá pohybem plynů a par a jejich interakcí s tělesy.

Vzájemné působení těles a tekutin probíhá třemi způsoby. V prvním případě tekutina stojí a těleso se pohybuje. Tento děj vzniká při jízdě automobilu za úplného bezvětrí. Ve druhém případě je stojící těleso obtékáno pohybující se tekutinou. Tento případ reprezentuje testování vozů v aerodynamickém tunelu. A třetí možností je, že se pohybuje jak samotné těleso, tak i tekutina kolem něj. Tento jev odpovídá nejčastější situaci při jízdě vozidla.

Aerodynamika vozidel představuje samostatnou kapitolu obecné aerodynamiky. Tato oblast je typická tím, že obtékaný objekt – vozidlo, je umístěno na podložce, na rozdíl například od aerodynamiky letadel, kde je objekt umístěn volně v prostoru. Obtékající tekutinou je vždy vzduch.

1.1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY OBTÉKÁNÍ TĚLESA

Při obtékání vzduchu okolo tělesa závisí charakter proudění na velikosti, tvaru a poloze tělesa vůči směru proudění a také na rychlosti a vlastnostech vzduchu.

PROUDĚNÍ

Pohyb, který vykonává vzduch i jakákoliv jiná tekutina během pohybu, se nazývá proudění. Při proudění se jednotlivé částice tekutiny pohybují neuspořádaným pohybem a současně se přemisťují ve směru proudění.

Proudění lze graficky zobrazit pomocí proudnic. Proudnice je čára znázorňující trajektorii jedné částice proudící tekutiny. Tečna k proudnici má směr okamžité rychlosti dané částice. Složením více proudnic lze získat obraz proudění. Pomocí toho obrazu je možno graficky znázornit obtékání vzduchu například kolem osobního automobilu. [2]

TYPY PROUDĚNÍ

Vzduch se řadí mezi reálné tekutiny, které jsou charakterizovány nenulovou hodnotou viskozity. U reálné tekutiny mohou při pohybu vznikat dva typy proudění – laminární a turbulentní.

Při laminárním proudění nedochází k míšení jednotlivých vrstev tekutiny a částice, proudící v jednotlivých vrstvách, mají stále stejnou trajektorii. U turbulentního proudění dochází k míšení jednotlivých vrstev tekutiny vlivem velké hodnoty smykového napětí mezi jednotlivými vrstvami. Částice tak neustále přechází z jedné vrstvy do druhé, což způsobuje vznik vírů.

VISKOZITA

Viskozita neboli vazkost charakterizuje velikost vnitřního tření v tekutině. Toto tření vzniká vzájemným působením přitažlivých sil mezi částicemi a tepelným pohybem jednotlivých

částic. Čím větší je působení vnitřních sil, tím větší je i hodnota viskozity a také odporu při pohybu jiné tekutiny či tělesa touto tekutinou.

Při laminárním proudění vzniká ve stykové ploše mezi vrstvami tekutiny proudícími různou rychlostí smykové napětí τ v důsledku výše popsaných jevů. Toto napětí je dle Newtonova zákona přímo úměrné gradientu smykové rychlosti $\frac{dv_l}{dy}$ [7]:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv_l}{dy}, \quad (1)$$

kde η představuje dynamickou viskozitu. Veličina dv_l odpovídá přírůstku rychlosti mezi dvěma vrstvami a dy přírůstku vzdálenosti těchto vrstev.

Dynamická viskozita (součinitel dynamické viskozity) tedy udává odpor, který vzniká mezi dvěma sousedními vrstvami tekutiny při vzájemném pohybu. Výše uvedený vztah ovšem platí pouze pro laminární proudění.

Kinematická viskozita ν (součinitel kinematické viskozity) je určena na základě hodnoty dynamické viskozity [7]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_f}, \quad (2)$$

kde ρ_f představuje hustotu tekutiny.

Viskozita tekutin je závislá na teplotě. S rostoucí teplotou tekutiny roste i její viskozita. Viskozita je závislá také na tlaku, ale změny jsou malé, takže je lze ve většině případů zanedbat. [16]

REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo je často využívaným kritériem při zkoumání chování proudění tekutiny. Hodnota tohoto čísla určuje, zda vzniká proudění laminární či turbulentní [3]:

$$Re = \frac{v_f \cdot l_t \cdot \rho_f}{\eta}, \quad (3)$$

kde v_f představuje rychlost proudění tekutiny a l_t je charakteristický rozměr obtékaného tělesa.

U automobilu se jako charakteristický rozměr udává rozvor, nebo průměr fiktivního kruhu, jehož obsah je totožný s maximální čelní plochou vozidla. [3]

Je-li pro dané podmínky obtékání tělesa vypočtená hodnota Reynoldsova čísla menší, než hodnota takzvaného kritického Reynoldsova čísla, jedná se o proudění laminární. V opačném případě vzniká proudění turbulentní. Hodnoty kritického Reynoldsova čísla se určují na základě experimentů. Například pro proudění tekutiny v trubce kruhového průměru se stanovila kritická hodnota na velikost 1000. Ovšem pro složitější tvary těles je určení kritického čísla již značně problematické. [3]

Reynoldsovo číslo je tedy funkcí rychlosti proudění. Při změnách rychlosti vzduchu se s měnícím Re mírně mění také vlastnosti proudového pole kolem vozu.

1.1.2 ZÁKONY ZACHOVÁNÍ PLATÍCÍ PRO TEKUTINY

Při zkoumání proudění reálných tekutin se využívají tři základní zákony. Zákon zachování hmotnosti je popsán rovnicí kontinuity, zákon zachování hybnosti rovnicí Navierova-Stokesovou a zákon zachování energie Bernoulliho rovnicí. [7]

ROVNICE KONTINUITY

Tato rovnice vychází z předpokladu, že hmotnost proudící tekutiny musí být zachována. Se změnou průtočného průřezu, přes který tekutina proudí, se tak musí měnit hustota tekutiny či rychlost jejího proudění. Obecný zápis rovnice kontinuity má následující tvar [7]:

$$\frac{d\rho_f}{dt} + \rho_f \cdot \operatorname{div} \vec{v}_f = 0, \quad (4)$$

kde \vec{v}_f představuje vektor rychlosti proudění tekutiny a t reprezentuje čas.

Hustota vzduchu se mění jen minimálně, tudíž velká změna průtočného průřezu vyvolá velkou změnu rychlosti proudění. Tento jev se projevuje například při vstupu vzduchu pod automobil, kdy dochází vlivem zmenšení průtočného průřezu k nárůstu rychlosti proudění pod vozem.

BERNOULLIHO ROVNICE

Bernoulliho rovnice popisuje změnu energie proudící tekutiny při změně jejího stavu [7]:

$$\frac{v_{f1}^2}{2} + \frac{p_{f1}}{\rho_f} + g \cdot h_{f1} = \frac{v_{f2}^2}{2} + \frac{p_{f2}}{\rho_f} + g \cdot h_{f2} + e_z, \quad (5)$$

kde p představuje tlak tekutiny, g tíhové zrychlení, h_f výškovou polohu tekutiny a e_z je rovno měrné ztrátové energii proudící tekutiny při změně stavu tekutiny. Index 1 určuje původní stav tekutiny a index 2 stav nový.

Výšková poloha proudícího vzduchu se u osobních automobilů mění málo a ztrátová energie proudícího vzduchu také není vysoká. Při snížení rychlosti proudění vzduchu kolem karosérie tedy dochází k výraznému nárůstu tlaku.

1.2 SILOVÉ ÚČINKY PROUDU VZDUCHU NA VOZIDLO

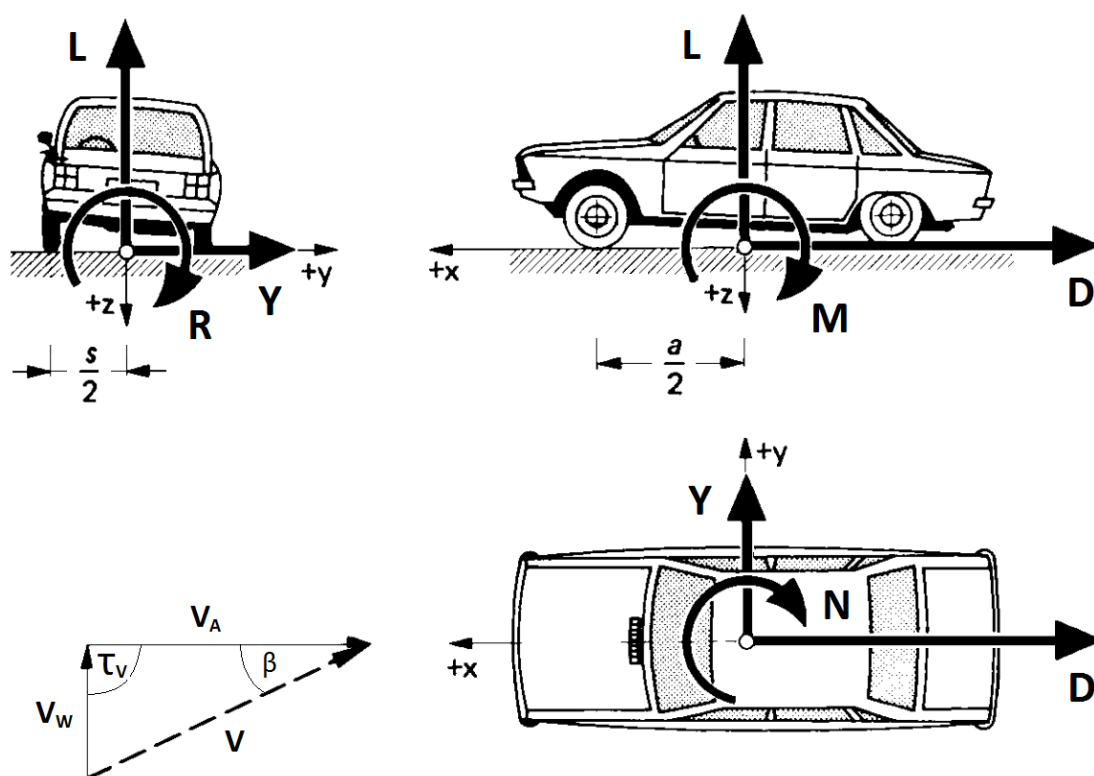
Při řešení aerodynamiky vozidel se většinou pracuje s modelem, kdy automobil stojí a pohybuje se okolní vzduch. Při reálných provozních podmínkách se ovšem nejčastěji pohybuje jak vůz, tak i okolní vzduch vlivem působení větru. Toto zjednodušení bylo zavedeno pro snadnější porozumění silovým účinkům mezi vzduchem a vozidlem.

V praxi se testování vozů často provádí v aerodynamických tunelech. Tento druh testování je snadno realizovatelný a opakovatelný. Avšak podmínky v aerodynamickém tunelu nejsou shodné s reálnou jízdou kvůli statické poloze vozu. Také je zde jiný relativní pohyb vzduchu vůči vozovce a nezahrnuje se vliv bočního větru.

1.2.1 SOUSTAVA AERODYNAMICKÝCH SIL A MOMENTŮ

Na jedoucí automobil působí takzvaný relativní proud vzduchu. Vliv tohoto proudu vzduchu na vozidlo je závislý na jeho rychlosti. Vektor rychlosti proudu je značen \vec{V} a je definován jako součet vektoru rychlosti větru \vec{V}_W působícího na vozidlo a vektoru rychlosti vozidla \vec{V}_A . Kladná hodnota vektoru rychlosti vozidla je uvažována proti směru jízdy vozu. [1][2]

Účinky relativního proudu vzduchu na povrch vozidla popisuje prostorová soustava elementárních sil, která je tvořena třemi silovým a třemi momentovými složkami. Poloha počátku tohoto pravotočivého souřadnicového systému je zobrazena na Obr. 1. Veličina a označuje rozvor vozu a veličina s rozchod nápravy. [3]



Obr. 1 Soustava aerodynamických sil a momentů působících na vozidlo při jízdě [3]

Úhel β zaznačený na předchozím obrázku se nazývá úhel vybočení relativního proudu vzduchu. Velikost tohoto úhlu lze určit pomocí následujícího vztahu [2]:

$$\tan \beta = \frac{V_W \cdot \sin \tau_V}{V_A + V_W \cdot \cos \tau_V}, \quad (6)$$

kde τ_V představuje úhel, který v rovině xy svírá vektor rychlosti vozu s vektorem rychlosti větru.

Velikost vektoru relativního proudu vzduchu lze určit pomocí kosinové věty:

$$V = \sqrt{V_A^2 + V_W^2 + 2 \cdot V_A \cdot V_W \cdot \cos \tau_V}. \quad (7)$$

AERODYNAMICKÉ SÍLY A MOMENTY PŮSOBÍCÍ NA VOZIDLO

Aerodynamické síly:

$$\text{Aerodynamický odpor (drag)} \quad D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot \rho \cdot A_c \quad (8)$$

$$\text{Aerodynamická boční síla (sideforce)} \quad Y = C_Y \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot \rho \cdot A_c \quad (9)$$

$$\text{Aerodynamický vztlak (lift)} \quad L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot \rho \cdot A_c \quad (10)$$

Aerodynamické momenty:

$$\text{Klopivý moment (rolling moment)} \quad R = C_R \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot \rho \cdot A_c \cdot l \quad (11)$$

$$\text{Klonivý moment (pitch moment)} \quad M = C_M \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot \rho \cdot A_c \cdot l \quad (12)$$

$$\text{Stáčivý moment (yawing moment)} \quad N = C_N \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot \rho \cdot A_c \cdot l \quad (13)$$

Veličiny C_D , C_Y , C_L , C_R , C_M , C_N jsou aerodynamické koeficienty (součinitele) daných sil a momentů. [4]

Veličina A_c je čelní plocha vozu, ρ představuje hustotu vzduchu a l je charakteristický rozměr vozidla, většinou rozvor. [2]

S měnícím se Reynoldsovým číslem se mírně mění vlastnosti proudového pole kolem vozu a s ním i hodnoty aerodynamických koeficientů. Hodnoty těchto koeficientů jsou tedy závislé na rychlosti proudění vzduchu okolo vozidla.

1.2.2 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Aerodynamický odpor hraje z hlediska jízdních odporů velkou roli. S rostoucí rychlostí vozidla se aerodynamický odpor zvyšuje a při dosažení rychlosti mezi 65 až 80 kilometry za hodinu se stává dominantním a způsobuje největší energetické ztráty. Při konstrukčním návrhu karosérie je tedy hlavní snahou minimalizovat aerodynamický odpor vozidla.

Dělení aerodynamického odporu [2][3]:

- tvarový odpor
 - tlakový – 50 až 80 %
 - třecí – 5 až 10 %
- odpor vznikající v důsledku aerodynamického vztlaku – 3 až 10 %
- odpor vznikající na tvarových detailech karosérie – 10 až 20 %
- odpor rotujících kol – 5 %
- odpor vznikající průchodem vzduchu přes systémy vozidla (topení, klimatizace atd.) – 10 až 20 %

TVAROVÝ AERODYNAMICKÝ ODPOR

Tvarový odpor je složen z odporu třecího a odporu tlakového. [2]

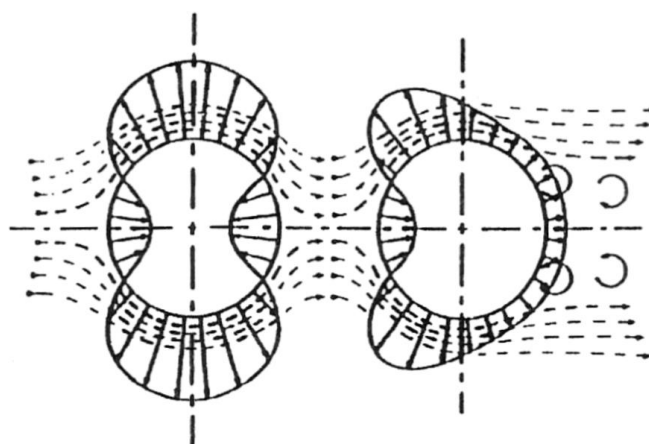
TŘECÍ AERODYNAMICKÝ ODPOR

Třecí odpor vzniká v důsledku tření částic vzduchu o povrch karosérie během proudění. Jeho velikost je závislá jak na vlastnostech vzduchu, tak na vlastnostech povrchu, a to především na drsnosti.

TLAKOVÝ AERODYNAMICKÝ ODPOR

Tlakový odpor vzniká v důsledku odtržení proudu vzduchu od povrchu tělesa, čímž vzniká takzvaný úplav. V ideálním prostředí k tomuto odtržení nedochází a tlakový odpor je nulový. U reálných těles vzniká úplav vždy.

Obr. 2 zobrazuje rozložení tlaku na povrchu válce při ideálním proudění (případ vlevo) a při reálném proudění (případ vpravo). V ideálním případě, kdy nedochází k odtržení, jsou tlakové síly na povrch tělesa rozloženy rovnoměrně a součet jednotlivých složek tlakových sil je nulový. Ovšem ve skutečném prostředí je součet tlakových složek ve směru proudění nenulový. Tento součet udává hodnotu tlakového odporu. Je-li působící statický tlak na povrch tělesa kladný, jedná se o aerodynamický přetlak, a naopak je-li záporný, jedná se o podtlak. Podtlak vzniká v oblasti úplavu, jelikož vzduch do tohoto místa proniká hůře. [2]



Obr. 2 Rozložení tlaku na povrchu válce [2]

Rozložení tlakových sil na reálném objektu je ovlivněno mnoha faktory. Mezi nejdůležitější faktory patří mezní vrstva. [2]

MEZNÍ VRSTVA

Při obtékání tělesa reálnou tekutinou dochází ke vzniku mezní vrstvy. V této vrstvě je rychlost jednotlivých částic různá v závislosti na vzdálenosti částice od povrchu tělesa. Částice v přímém kontaktu s povrchem mají nulovou rychlost. To je způsobeno třením částic o nerovnosti na povrchu tělesa. Rychlost částic, které jsou v kontaktu s částicemi stojícími, už není nulová, ale je nízká kvůli vzájemnému tření. S rostoucí vzdáleností částic od povrchu tělesa narůstá i jejich rychlost. Mezní vrstva končí tehdy, dosáhne-li částice v určité vzdálenosti od povrchu tělesa rychlosti, s jakou se pohybuje okolní proudící vzduch, který není ovlivněn přítomností tělesa.

Mezní vrstva může být laminární či turbulentní. Laminární mezní vrstva vzniká při malých rychlostech proudění okolo tělesa a je charakterizována malým Reynoldsovým číslem, zatímco turbulentní vrstva vzniká při vysokých rychlostech. [5]

Stejně, jako v případě samotného proudění, udává kritická hodnota Reynoldsova čísla okamžik, kdy dojde k přechodu mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou. Kritická hodnota se většinou pohybuje v rozmezí mezi $2 \cdot 10^5$ až $3 \cdot 10^6$ v závislosti na míře turbulencí v přicházejícím proudu vzduchu a drsnosti povrchu obtékaného tělesa. Pokud bude hodnota Reynoldsova čísla přibližně stejná jako kritická hodnota, vznikne přechodová mezní vrstva. [5]

Jaká mezní vrstva vzniká, závisí hlavně na rychlosti proudění. Kolem karosérie se vzduch většinu času pohybuje rychlostí, která odpovídá vzniku turbulentní mezní vrstvy a laminární vrstva se vyskytuje jen v přední části karosérie. [2]

Při obtékání tělesa dochází k odtržení mezní vrstvy. Ve kterém místě na povrchu tělesa k odtržení dojde, závisí na rychlosti proudění, na drsnosti obtékaného povrchu, na tlakovém gradientu a na typu mezní vrstvy. Vzniká-li mezní vrstva laminární, dochází k odtržení dříve, než v případě vrstvy turbulentní. To je zapříčiněno tím, že částice v turbulentní mezní vrstvě ztrácejí kinetickou energii pomaleji díky vyššímu tření. [5]

ODTRŽENÍ PROUDU VZDUCHU

Karosérie automobilu se z hlediska odtržení proudu vzduchu dělí na dvě oblasti. Dělicí rovinou je přibližně rovina maximálního příčného průřezu vozu. V první oblasti, která je tvořena přední částí vozu, dochází k urychlování proudu vzduchu, klesá statický tlak a tlakový spád klesá do záporných hodnot. Ve druhé oblasti, která je tvořena zadní částí vozu, dochází ke zpomalování proudícího vzduchu, zvyšuje se tlak a tlakový spád je kladný. Tento jev vede k odtržení proudu vzduchu od karosérie a následnému vzniku úplavu za vozidlem. [1][2]

U většiny automobilů dochází k výraznému odtržení vzduchu také na spojnici čelního skla a kapoty. V menší míře dochází k odtrhávání na prvcích vystupujících z karosérie (např. zpětná zrcátka), na hranách karosérie (A či C sloupky), na bočnicích pneumatik a podobně.

ÚPLAV ZA VOZIDLEM

U moderních automobilů vzniká hlavní část aerodynamického odporu v úplavu. Vznik úplavu je nejvíce ovlivněn zadní částí vozu. V této oblasti klesá rychlost proudění vzduchu a vznikají víry, které vyvolávají negativní tlak v zadní části automobilu. Tento tlak působí proti pohybu vozidla a zvyšuje tak aerodynamický odpor celého vozu. Velikost vznikajícího tlaku je ovlivněna řadou faktorů. Hlavním z nich je tvar a velikost zadní části vozu. [2]

ODPOR INDUKOVANÝ V DŮSLEDKU AERODYNAMICKÉHO VZTLAKU

Pokud se vozidlo pohybuje, působí na jeho povrch statický tlak. Hodnota statického tlaku se mění po celém povrchu karosérie. Díky těmto rozdílům dochází k přemísťování vzduchu, kterým je vozidlo obklopeno. Vzduch se pohybuje z míst s velkým tlakem do míst, kde je tlak nižší. Vzduch proudící pod vozidlem tak má snahu přemístit se na boční část karosérie. Tento jev má za následek vznik vířivého proudění kolem bočních částí vozu. Vznikající víry se nazývají odtokové či boční víry. Intenzita a velikost vírů je závislá na tvaru karosérie a na rozdílu tlaků mezi horní a spodní částí karosérie, který je přímo úměrný rychlosti vozidla. Na koncové hraně karosérie jsou víry pohlceny úplavem za vozidlem, což vede ke snížení

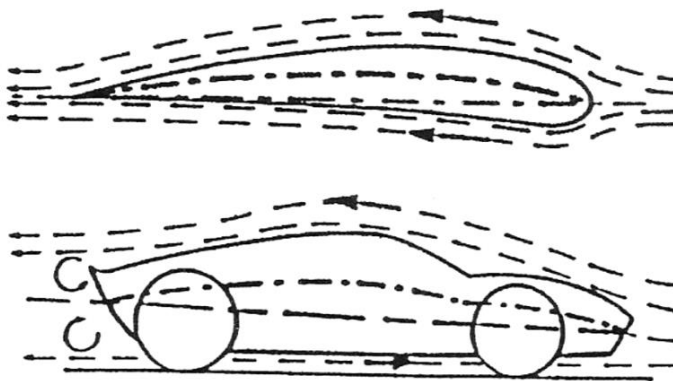
statických tlaků za vozidlem. Nižší statický tlak za vozidlem má za následek vznik aerodynamického odporu indukovaného vztlakem. Jeho hodnota lze určit z následující rovnice [2]:

$$D_i = L \cdot \sin \varepsilon, \quad (14)$$

kde ε vyjadřuje úhel odklonění vztlakové síly od svislé osy vozu vlivem působení bočních odtokových vírů.

1.2.3 AERODYNAMICKÝ VZTLAK

Aerodynamický vztlak u automobilu vzniká podobně jako vztlak u profilu křídla, viz Obr. 3. Proud vzduchu obtékající horní povrch karosérie urazí za stejný časový okamžik větší dráhu, než proud vzduchu obtékající spodní část karosérie. Proud vzduchu proudící nad karosérií má vyšší rychlost a působí tak na povrch karosérie menším tlakem. Rozdíl tlaku mezi horní a spodní částí karosérie má za následek vznik vztlakové síly.

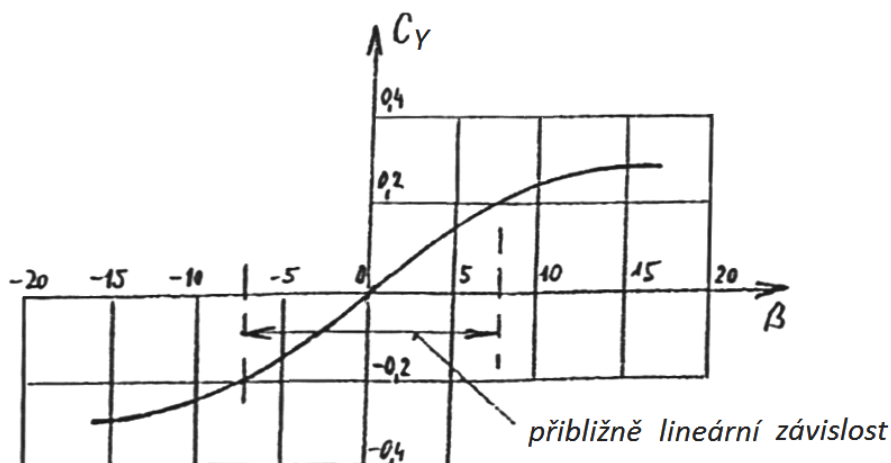


Obr. 3 Vznik vztlakové síly u automobilu [2]

Aerodynamická vztlaková síla působí kolmo ke směru pohybu vozu. Působí-li vztlaková síla směrem od vozovky vzhůru, vzniká kladný aerodynamický vztlak. Působí-li síla směrem do vozovky, vzniká záporný vztlak neboli přítlak. Při obtékání osobních automobilů vzniká ve většině případů kladná vztlaková síla. Kladná hodnota vztlaku je nevýhodná z toho hlediska, že odlehčuje jednotlivá kola a pneumatiky tak přenesou méně síly na vozovku, čímž se zhoršují jízdní vlastnosti vozidla.

1.2.4 AERODYNAMICKÁ BOČNÍ SÍLA

Při působení bočního větru na vozidlo vzniká aerodynamická boční síla, která ovlivňuje směrovou stabilitu – schopnost vozidla udržovat požadovaný směr jízdy. Aerodynamická boční síla je závislá na bočním proudu vzduchu, tedy na úhlu vybočení relativního proudu vzduchu, se kterým se mění součinitel boční síly, viz Obr. 4. Velikost tohoto součinitele závisí také na tvaru karosérie. Kulaté boky součinitel snižují, zatímco větší boční plocha přídě součinitel zvyšuje. Nižších hodnot součinitele boční síly dosahují karosérie se splývavou zádí, jakými jsou například fastback či coupe. Naopak karosérie typu combi má v rámci osobních automobilů součinitel vysoký. [1][2]



Obr. 4 Vliv úhlu β na součinitel boční síly C_Y [2]

1.2.5 AERODYNAMICKÝ STÁČIVÝ MOMENT

Velikost aerodynamického stáčivého momentu je závislá na poloze bodu, ve kterém působí aerodynamická boční síla. Tento bod se nazývá tlakový bod. Leží-li tlakový bod před těžištěm vozu, natáčí stáčivý moment automobil ve směru působení bočního větru a tím destabilizuje vozidlo. Pokud leží tlakový bod až za těžištěm, vznikající moment natáčí automobil proti směru působení bočního větru a tím jej stabilizuje. [3]

Součinitel stáčivého momentu bývá nejnižší u vozů typu combi, jelikož velká boční plocha zadní části karosérie posouvá působíště boční síly směrem dozadu, blíže k těžišti automobilu. Nejvyšší součinitel mívají automobily se splývavou zadí. Tento předpoklad je ovšem jen obecný, jelikož velikost stáčivého momentu závisí na podélné poloze těžiště, která se u jednotlivých modelů automobilů může značně odlišovat. [2]

1.2.6 AERODYNAMICKÝ KLOPIVÝ MOMENT

Klozivý moment ovlivňuje vozidlo při naklánění kolem podélné osy, například při průjezdu zatáčkou. Jeho velikost je závislá na vzdálenosti působíště odporové síly od osy klopení. Tato osa spojuje okamžité středy klopení odpružené hmoty obou náprav. [2]

1.3 Vliv aerodynamických sil na parametry vozu

Tato kapitola poukazuje na hlavní motivaci při optimalizaci velikosti aerodynamických sil působících na vozidlo. Aerodynamické síly totiž značně ovlivňují důležité parametry automobilu, jakými jsou ovladatelnost a stabilita, využitelný výkon, akcelerace, maximální rychlost či spotřeba paliva. [1]

U sériových automobilů je z hlediska aerodynamiky kladen důraz hlavně na snižování spotřeby paliva a tím i množství vznikajících emisí. Důležitým faktorem je i zvyšování stability a ovladatelnosti. U sportovních a závodních vozů se aerodynamika navrhuje s ohledem na maximální výkon, zrychlení a maximální přenositelnou sílu z kol na vozovku, která zaručuje také dobrou ovladatelnost.

1.3.1 VÝKON MOTORU

Při jízdě konstantní rychlostí bez stoupání je výkon motoru P_M , vynásobený mechanickou účinností η_m , roven součtu ztrátového výkonu způsobeného valivým odporem P_O a ztrátového výkonu způsobeného aerodynamickým odporem P_D [1][2][6]:

$$P_M \cdot \eta_m = P_O + P_D = O_\phi \cdot V + D \cdot V, \quad (15)$$

kde O_ϕ představuje valivý odpor.

Ztrátový výkon způsobený aerodynamickým odporem je tedy roven:

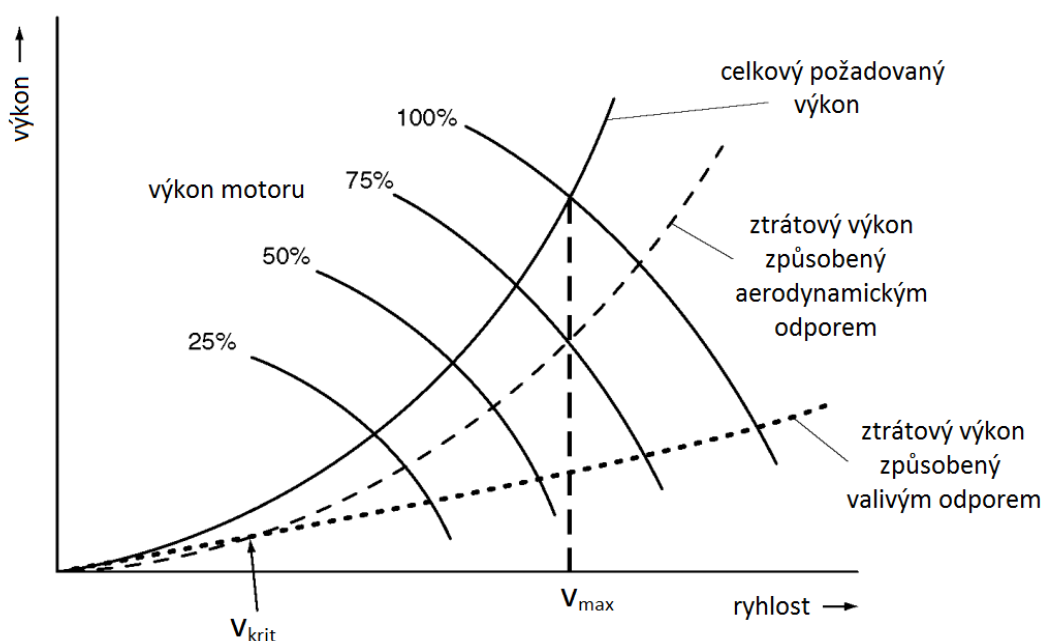
$$P_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot V^3 \cdot \rho \cdot A_c. \quad (16)$$

Valivý odpor je také ovlivňován aerodynamickou silou, přesněji vztlakem [1][2]:

$$O_\phi = (m_v \cdot g - L) \cdot f, \quad (17)$$

kde f představuje součinitel valivého odporu a m_v je hmotnost vozidla.

Na Obr. 5 je znázorněn progresivní nárůst ztrátového aerodynamického výkonu v závislosti na rychlosti. Ztrátový výkon způsobený valivým odporem roste téměř lineárně. Do kritické rychlosti v_{krit} je dominantní působení ztrátového výkonu způsobeného valivým odporem, ovšem po překročení této rychlosti začíná růst ztrátový aerodynamický výkon mnohonásobně rychleji a stává se dominantním. Kritická rychlost se pohybuje okolo hodnoty 75 km/h. Při dosažení maximální rychlosti v_{max} je součet ztrátových výkonů roven maximálnímu výkonu motoru. [1]



Obr. 5 Závislost ztrátového výkonu na rychlosti jízdy [1]

1.3.2 MAXIMÁLNÍ RYCHLOST

Pro určení vlivu aerodynamického odporu na maximální rychlost automobilu je využita rovnice rovnováhy pohybových sil působících na vozidlo. Stejně, jako v případě určení ztrátového výkonu, je uvažována konstantní rychlost jízdy po vodorovném povrchu. V tomto případě má rovnice rovnováhy sil následující tvar [6]:

$$F_T = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A_c + (m_v \cdot g - L) \cdot f, \quad (18)$$

kde F_T představuje sílu na hnacích kolech automobilu.

Z této rovnice je možno určit maximální rychlost vozidla:

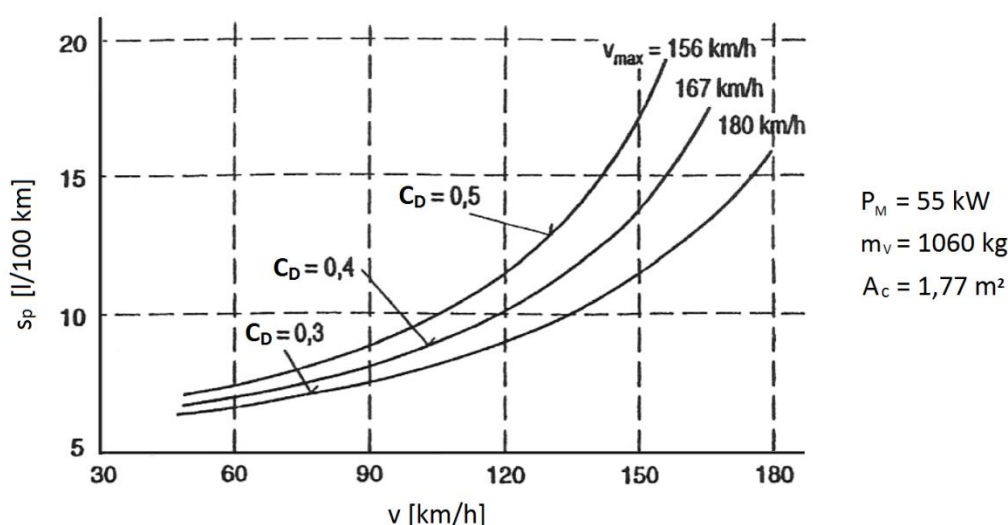
$$v_{max} = \sqrt{\frac{F_{Tmax} - m_v \cdot g \cdot f}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_c \cdot (C_D - C_L \cdot f)}}. \quad (19)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že maximální rychlost vozu je závislá jak na součiniteli aerodynamického odporu, tak na součiniteli aerodynamického vztlaku. Přitom platí, že se snižující se velikostí součinitele odporu roste maximální rychlost. Vliv součinitele vztlaku nelze jednoznačně posoudit. Bude-li jeho hodnota růst, dle rovnice by měla růst také hodnota maximální rychlosti, ovšem vyšší aerodynamický vztlak snižuje adhezní sílu mezi pneumatikou a vozovkou a tím i maximální hnací sílu, kterou je pneumatika schopna přenést.

1.3.3 SPOTŘEBA PALIVA

Hodnota okamžité spotřeby paliva je závislá na okamžitém požadovaném výkonu motoru. Hodnota požadovaného výkonu roste s rostoucí hodnotou aerodynamického odporu, jak bylo uvedeno výše. S aerodynamickým odporem tedy poroste také spotřeba paliva.

Obr. 6 vykresluje závislost spotřeby paliva s_p na různých hodnotách součinitele aerodynamického odporu pro celý rozsah rychlosti jízdy vozidla v . [2]



Obr. 6 Závislost spotřeby paliva na rychlosti jízdy pro různé hodnoty C_D [2]

1.3.4 STABILITA JÍZDY

Velmi důležitým parametrem, který je ovlivňován aerodynamickými silami, je stabilita automobilu během jízdy. Na stabilitu vozu při zatáčení má vliv velikost zatížení působící na jednotlivých nápravách. Toto zatížení je značně ovlivňováno vztlakovou silou. Je-li jedna náprava zatížena méně, dokáže při průjezdu zatáčkou přenést méně boční síly. Na této nápravě tedy dojde dříve ke ztrátě přilnavosti.

Velikost maximální boční síly, kterou je pneumatika schopna přenést bez ztráty přilnavosti, závisí mimo jiné i na velikosti směrové tuhosti pneumatiky. V případě, že dojde ke snížení hodnoty směrové tuhosti, sníží se také maximální přenositelná boční síla. Směrová tuhost pneumatiky klesá s klesající hodnotou působícího zatížení na nápravě. Zatížení klesá také s rostoucím aerodynamickým odporem, ovšem hlavně s rostoucí hodnotou vztlakové síly, která narůstá s kvadrátem rychlosti. Se vzrůstající rychlostí vozu tedy klesá maximální hodnota přenositelné boční síly a automobil v zatáčkách ztrácí přilnavost. [23]

Zda bude vozidlo při průjezdu zatáčkou přetáčivé či nedotáčivé určuje takzvaný understeer gradient, značený K [23]:

$$K = \frac{W_F + L_F}{C_{\alpha F}} - \frac{W_R + L_R}{C_{\alpha R}}, \quad (20)$$

kde $W_{F/R}$ vyjadřuje celkové zatížení nápravy ovšem bez zahrnutí vlivu vztlakové síly, $L_{F/R}$ je vztlaková síla působící na nápravu a $C_{\alpha F/R}$ představuje směrovou tuhost pneumatik na nápravě. Index F označuje přední nápravu a index R nápravu zadní. [23]

Je-li K záporné, vozidlo je přetáčivé a naopak, je-li understeer gradient kladný, je vůz nedotáčivý. Z hlediska stability jízdy je výhodnější nedotáčivé vozidlo, protože boční síla působící v těžišti vozu je kompenzována reakčními silami zadních pneumatik a vůz tak nepřechází do smyku. Nevýhodou je neschopnost řídit směr jízdy. [23]

Příkladem automobilu, u něhož měly aerodynamické síly značný vliv na stabilitu, může být Porsche 911, viz Obr. 7. Tento model byl uveden na trh v roce 1964 a již od počátku měl problém se ztrátou stability během jízdy vysokou rychlostí. Ve vysokých rychlostech docházelo ke ztrátě přilnavosti na zadní nápravě, čímž se vůz dostal do smyku a mnohdy havaroval. Následky těchto havárií byly často fatální. Smyk vznikal, protože na zadní nápravu vozu působila ve vysoké rychlosti velká vztlaková síla a to díky tvaru zadní části vozu.

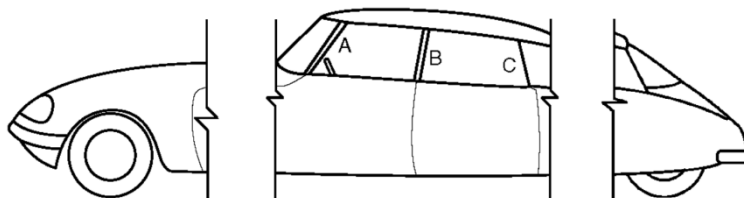
Vůz byl konstruován se záměrem minimalizovat odporovou sílu bez ohledu na velikost síly vztlakové. Celá zadní část Porsche 911 se mírně svažuje, pod úhlem přibližně 30 stupňů. Díky pozvolnému klesání zádi dochází k odtržení proudu vzduchu a vzniku úplavu až na její koncové hraně, tedy až za zadními koly. Rychlost proudění vzduchu na povrchu zádi je tedy vysoká a tlak nízký, což způsobuje vznik velké vztlakové síly na zadní nápravě. Hlavním opatřením, které zajistilo snížení vztlaku na zadní nápravě, bylo využití zadního spojleru. Ten byl poprvé použit v roce 1973 u modelu 911 RS. Koeficient vztlaku na zadní nápravě se tak značně snížil, a to z hodnoty 0,264 na 0,084. Nepatrně se snížil také koeficient vztlaku na nápravě přední. Koeficient aerodynamického odporu naopak narostl o hodnotu 0,012. [17]



Obr. 7 Porsche 911 1964 a 911 RS 1973 [18][19]

1.4 VLIV JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ KAROSÉRIE NA AERODYNAMIKU VOZU

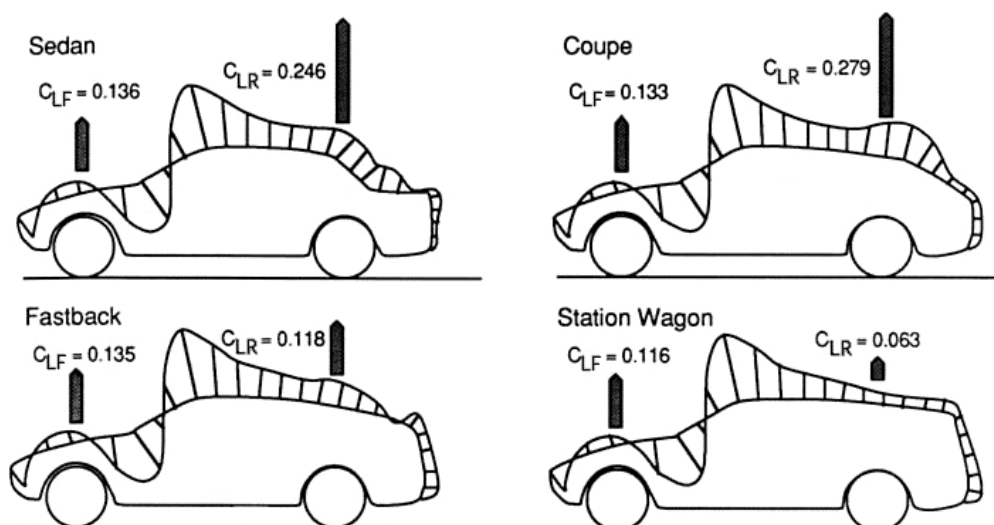
Při řešení aerodynamiky jednotlivých komponentů karosérie se vůz obvykle dělí na přední, střední a zadní část, viz Obr. 8. Uvažuje se přitom jízda za bezvětří, kdy vzduch proudí paralelně s vodorovnou osou vozidla.



Obr. 8 Rozdělení vozu na přední, střední a zadní část [1]

V přední části automobilu je vzduch urychlován, což má za následek snížení tlaku na povrchu karosérie v této oblasti. V prostřední části karosérie dochází ke zpomalení proudu vzduchu a v zadní části vzduch již proudí nízkou rychlostí a dále zpomaluje. Následně dojde k jeho odtržení od povrchu karosérie a vzniku úplavu. K odtržení dojde vždy, ovšem je možno ovlivnit, ve kterém místě zadní části karosérie k odtržení dojde. [1]

Obr. 9 zobrazuje, jak tvar karosérie ovlivňuje velikost koeficientu vztlaku na přední nápravě C_{LF} a koeficientu vztlaku na zadní nápravě C_{LR} . Také je zde vykreslen průběh tlaku po povrchu karosérie.



Obr. 9 Hodnoty koeficientu vztlaku pro jednotlivé typy karosérie [20]

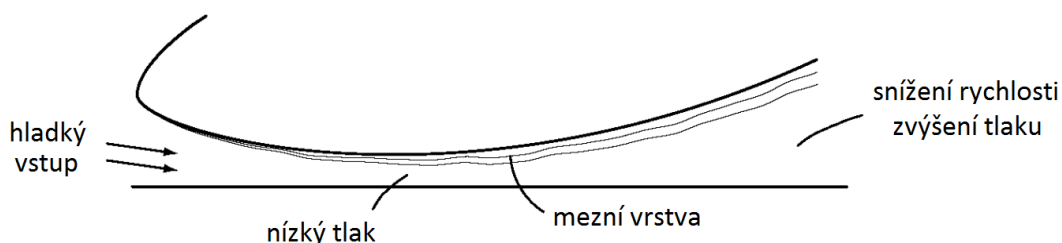
Vztlaková síla na předních kolech má podobnou hodnotu u všech typů karosérie. To je dáno tím, že přední část většiny vozů je tvarována podobně. Na zadních kolech je už ale značný rozdíl. Nejvyšší součinitel vztlaku na zadní nápravě má karosérie typu coupe a nejnižší station wagon neboli combi. Karosérie se svažitou zádí typu sedan a coupe mají z hlediska vztlaku horší vlastnosti, jelikož rychlost proudění vzduchu v oblasti nad zadními koly je vysoká. Tyto vozy ovšem většinou dosahují nižšího součinitele aerodynamického odporu.

1.4.1 PODVOZEK A VOZOVKA

Jak již bylo zmíněno výše, vozovka značně ovlivňuje proudění vzduchu kolem vozidla a tím ovlivňuje aerodynamické síly působící na automobil.

Při obtékání vzduchu kolem jedoucího vozidla dochází vlivem mezní vrstvy vznikající na spodní části karosérie ke zpomalování proudu vzduchu proudícího pod vozidlem. Hodnota tohoto zpomalení závisí na světlé výšce podvozku. Toto zpomalení má za následek zvýšení tlaku pod vozidlem, které vyvolá zvýšení kladné vztlakové síly. Také dochází k přesunu části proudu vzduchu k okrajům podvozku a vzniku vírů po stranách vozu, které negativně ovlivňují proudění vzduchu v této oblasti a zvyšují celkový aerodynamický odpor. [1][2][3]

Při proudění vzduchu pod automobilem dochází také k Venturiho efektu. Venturiho efekt říká, že při zmenšení průtočného průřezu naroste rychlost proudění tekutiny a klesne její tlak. Tyto skutečnosti vycházejí z rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice. Ke zmenšení průřezu dochází při vstupu vzduchu pod automobil, což má za následek snížení tlaku pod vozidlem. Díky Venturiho efektu vzniká pod vozidlem záporná vztlaková síla. Velikost této síly je závislá na zakřivení spodní části vozu. Na Obr. 10 je zobrazen nejvhodnější tvar profilu spodní části vozidla. [1][3]



Obr. 10 Nejvhodnější profil zakřivení spodní části vozu [1]

Zda bude ve výsledku pod automobilem vznikat kladná či záporná vztlaková síla závisí na tom, který z těchto jevů bude dominantní. Obecně platí, že u automobilů s velmi nízkou světlou výškou je vliv mezní vrstvy na zpomalení proudu vzduchu větší než Venturiho efekt a dochází ke vzniku kladné vztlakové síly, která zvyšuje celkovou hodnotu kladného aerodynamického vztlaku. Ovšem zvýší-li se světlá výška automobilu nad určitou hranici, stane se dominantním Venturiho efekt a pod vozidlem bude vznikat podtlak. [2]

Podvozek překrytý podvozkovými panely také pomáhá snižovat vztlak a jejich vhodným tvarováním je možno proud vzduchu dále usměrňovat dle potřeby. Vznik přitlaku je možno ovlivnit také pomocí spoilerů umístěných mezi vozovkou a spodní částí karosérie na přední hraně vozu. [4]

Velikost a orientace celkového aerodynamického vztlaku je tedy závislá na světlé výšce vozidla a na povrchu a zakřivení spodní části automobilu.

1.4.2 PŘEDNÍ ČÁST KAROSÉRIE

Na aerodynamické síly, které vznikají v přední části vozidla, má velký vliv poloha náběžné hrany. Náběžná hrana rozděluje vzduch obtékající vozidlo na dva proudy. Jeden proud obtéká horní povrch karosérie a druhý obtéká její spodní část. Se zvětšující se vzdáleností náběžné hrany od vozovky se zvyšuje i množství vzduchu, které je strháváno pod vozidlo. Tento jev má za následek zvýšení rychlosti vzduchu pod vozidlem a snížení tlaku. Se zvyšující se vzdáleností náběžné hrany od vozovky tedy roste i velikost negativní vztlakové síly působící na vozidlo. Ovšem při snižování náběžné hrany můžeme docílit ploché kapoty, pomalu se svázející až k vozovce. Tato konstrukce snižuje maximální tlaky působící v místě přední kapoty a skla, což vede k celkovému snížení vztlaku. U osobních automobilů je ovšem přílišné snižování náběžné hrany nežádoucí, a to jak z hlediska bezpečnosti, tak velikosti zástavbového prostoru pro motor. [2]

Vzdálenost náběžné hrany od vozovky má vliv také na aerodynamický odpor. Čím je hrana výše, tím je vznikající odpor větší. Pro minimalizaci aerodynamického odporu by měla přední část vozu přecházet do kapoty a spodní části karosérie plynule. Vhodné tvarování předního nárazníku také značně přispívá ke snížení velikosti aerodynamického odporu. [1]

V přední části karosérie většinou nedochází k masivnějšímu odtrhávání vzduchu, kromě jedné výjimky. Touto výjimkou je místo přechodu kapoty a čelního skla, kde je vzduch značně zpomalován a dochází tak k jeho odtržení. Po odtržení se díky nevhodnému rozložení tlaku v této oblasti proud vzduchu dělí na dvě části. Jedna část vzduchu proudí dále přes čelní sklo až ke střeše vozu. V druhé části vzduchu začnou vnikat víry. Víry vznikají v ose podélné symetrie karosérie, odkud se pohybují do stran, pokračují kolem A-sloupků a následně podél boků vozidla. Chování proudu vzduchu v této oblasti je ovlivněno zakřivením profilu kapoty a čelního skla a hlavně úhlem, který svírá čelní sklo a kapota. Čím je úhel menší, tím více je proud vzduchu v tomto místě zpomalován. [1][2]

1.4.3 STŘEDNÍ ČÁST KAROSÉRIE

Tato část začíná A-sloupkem a končí u C-sloupku (případně D-sloupku). Sloupky B, C, (D) by měly být v jedné rovině s bočními skly a jejich profil by měl být aerodynamický. Střecha bývá mírně vyklenutá, což přispívá k odtržení proudu vzduchu až v zadní části vozu. [1][2]

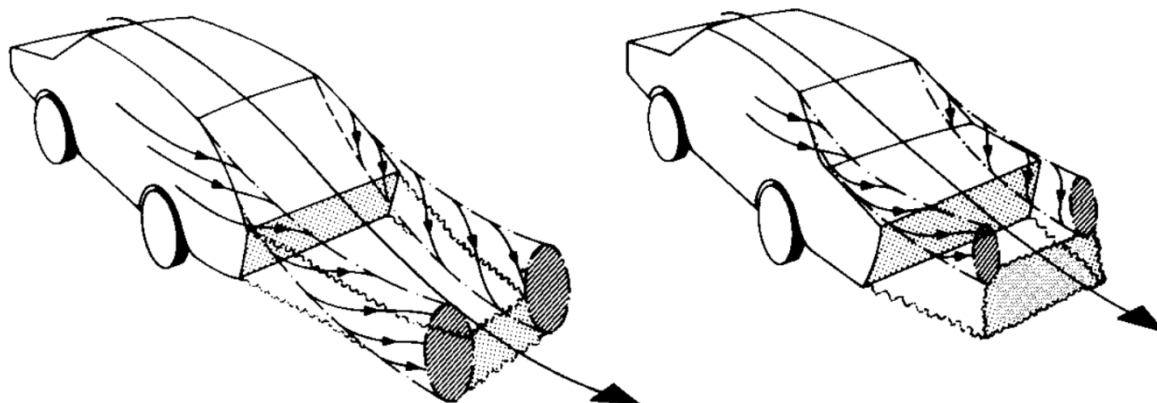
1.4.4 ZADNÍ ČÁST KAROSÉRIE

Tvar zadní části karosérie má vliv především na hodnotu vztlaku působícího na zadní nápravu. Při obtékání zádi automobilu je již proudící vzduch značně ovlivněn přední a střední částí karosérie.

Čím více je zadní část vozu svažitá a hladká, tím méně dochází k odtrhávání vzduchu od karosérie a tím menší je i aerodynamický odpor vozidla. Vzduch proudí po povrchu svažité zádi vysokou rychlostí. Tlak v této oblasti karosérie tak dosahuje malých hodnot, což má za následek vznik velké vztlakové síly na zadní nápravě. Vzduch obtéká vozidlo až k jeho zadní

hraně. Zde dojde k odtržení vzduchu a ke vzniku vírů, které se dostávají pod zadní část vozu a dále zvyšují kladnou vztlakovou sílu. [2]

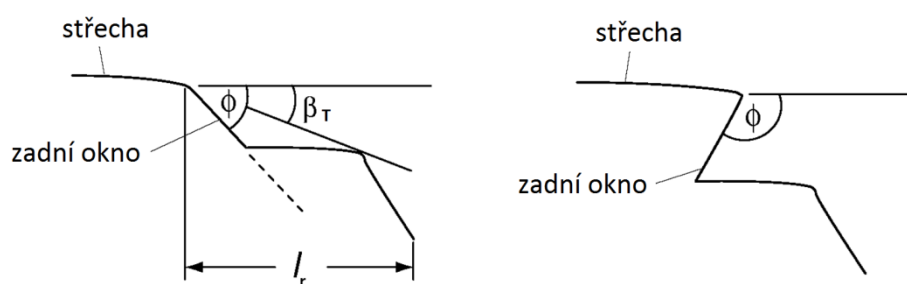
Na bocích vozidla se vlivem přítomnosti C-sloupků (nebo D-sloupků, jsou-li přítomny) vytváří víry. Víry postupují dozadu, omílají zadní část vozu a přecházejí na zadní víko zavazadlového prostoru, viz Obr. 11. Rozložení tlaku v zadní části vozu tedy závisí také na konstrukci oblasti zadního okna, C či D sloupku a víka zavazadlového prostoru. [1]



Obr. 11 Vznik vírů na bocích automobilu [3]

Rozložení tlaku v zadní části automobilu je také ovlivňováno víry, které vznikají v přední části vozu a jako důsledek proudění vzduchu pod automobilem, jak bylo popsáno výše.

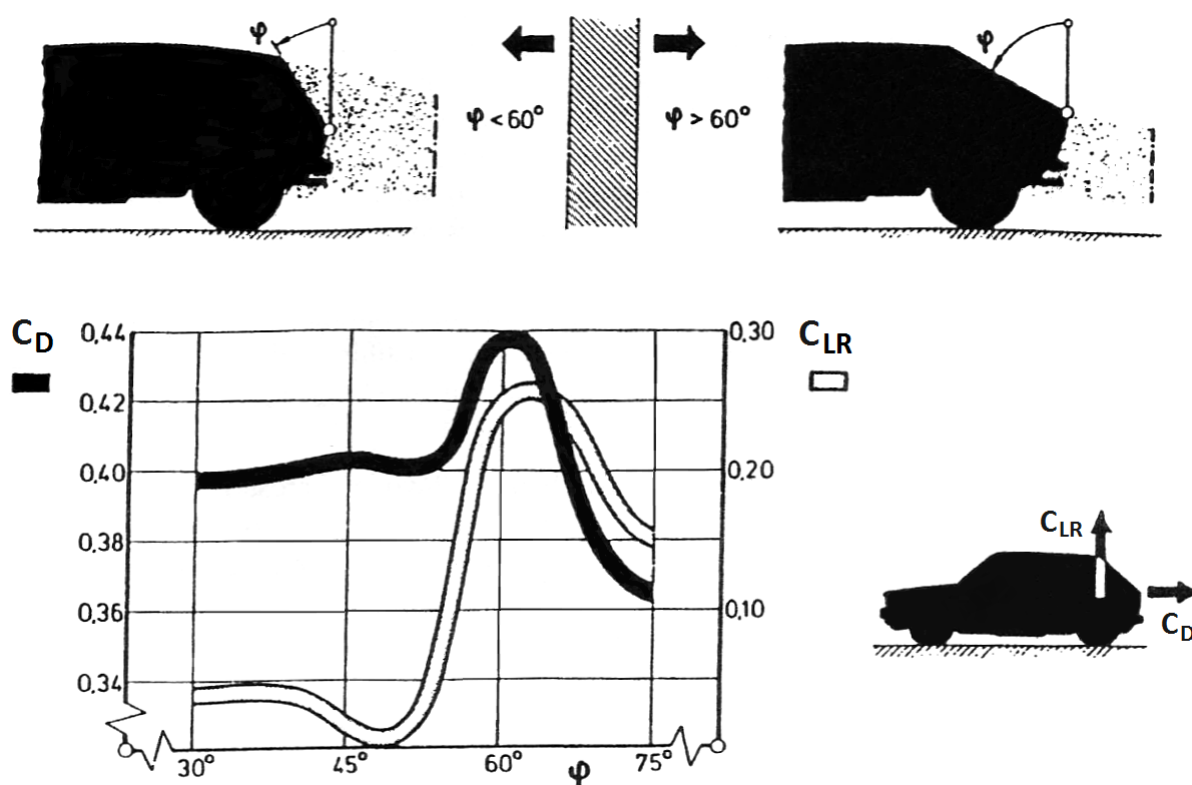
Aerodynamický odpor i vztlak narůstá s rostoucím úhlem přechodu mezi střechou a zadním oknem Φ , viz Obr. 12. Kritickou hodnotou toho úhlu je 50 stupňů. Po překročení této kritické hodnoty začíná vztlak i odpor značně klesat. Hodnota úhlu Φ , pro kterou je aerodynamický odpor nejmenší, je závislá na vzdálenosti horního okraje zadního skla a koncového okraje víka zavazadlového prostoru l_r . Z hlediska aerodynamiky je výhodnější tupý úhel Φ , jako na obrázku Obr. 12 vpravo. [1]



Obr. 12 Geometrie zadního okna [1]

V minulosti bylo provedeno několik pokusů, které se snažily odvodit vztah mezi úhlem Φ a úhlem β_T . Úhel β_T vyjadřuje úhel mezi rovinou střechy vozu a okrajem víka zavazadlového prostoru viz Obr. 12. Výsledky jednoho pokusu ukázaly, že nejvýhodnějších aerodynamických parametrů je dosaženo při zvolení úhlu β_T rovno 25 stupňům pro karosérii typu notchback. Notchback je velmi podobný sedanu, ale zadní okno má velký úhel Φ . Pro fastback je doporučena hodnota úhlu β_T menší než 30 stupňů. Tyto hodnoty byly stanoveny při využití plochých povrchů zadního okna a víka zavazadelníku. Zaoblení karosérie značně ovlivní celkové aerodynamické poměry vozu. [1]

Vliv sklonu zadního okna φ na aerodynamické parametry u karosérie typu hatchback zobrazuje situace zachycená na Obr. 13, který publikovala automobilka Volkswagen. [2]



Obr. 13 Vliv sklonu zadního okna na aerodynamické parametry vozu VW Golf [2]

V případě tohoto automobilu byla kritická hodnota sklonu zadního okna 62 stupňů. Při této hodnotě se neustále přesouvalo místo odtržení proudu vzduchu a to po celé délce zadního okna. Součinitel odporu i součinitel vzlaku dosahovaly nejvyšších hodnot. Pokud byl úhel menší, došlo k odtržení na konci střechy. V případě, že byl úhel sklonu větší než 62 stupňů, došlo k odtržení v místě počátku zadního čela vozu. Z hlediska minimalizace součinitele odporu je výhodnější mírněji svažitá zad', zatímco minimalizaci součinitele vzlaku na zadní nápravě odpovídá zad' klesající strměji. [2]

Nabývá-li sklon zádi automobilu kritické hodnoty, je možno vyvolat odtržení proudu vzduchu na okraji střechy. K tomuto účelu slouží spoiler, který přesahuje za zadní okno, čímž prodlužuje samotnou střechu vozu. [2]

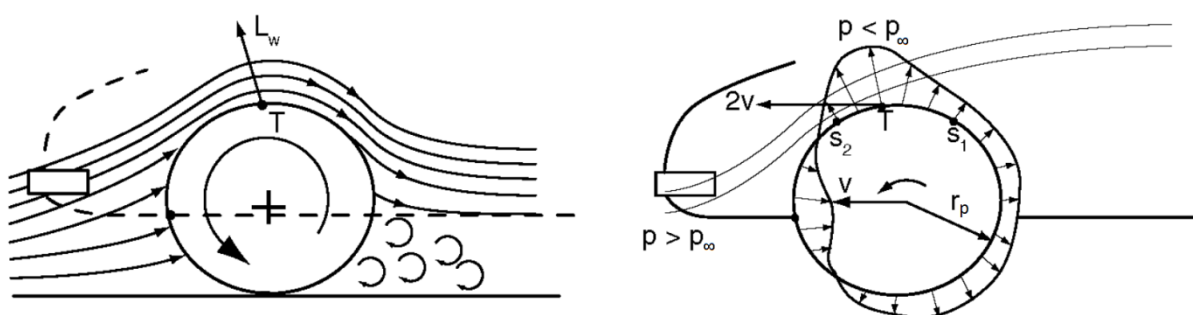
1.4.5 PRVKY VYSTUPUJÍCÍ Z KAROSÉRIE

Prvkem vystupujícím z karosérie jsou například vnější zpětná zrcátka. Při měření parametrů automobilu v aerodynamickém tunelu se ukazuje, že aerodynamický odpor vozidla se zrcátky je větší, než součet odporu vozidla bez zrcátek a odporu zrcátek samotných. Tento jev je způsoben vzájemnou interakcí proudu vzduchu obtékající vozidlo s proudem obtékajícím zpětné zrcátko. Tento poznatek neplatí pouze pro zrcátka, ale pro každý prvek vystupující z karosérie. [1]

1.4.6 KOLA

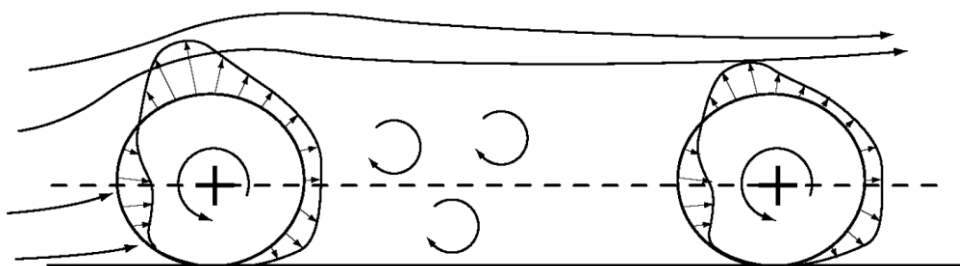
Automobilové pneumatiky mají dopad na zvýšení součinitele odporu o hodnotu až 0,08 a součinitele vztlaku v rozmezí od 0,3 až do 0,58. Rotující kola produkují vířivé proudění, které značně ovlivňuje proudění vzduchu kolem boků vozidla a vznik úplavu za vozidlem. [1]

Trajektorie jednotlivých částic vzduchu obtékajících kolo a rozložení tlaku okolo pneumatiky jsou zobrazeny na Obr. 14. V horní části kola (bod T) je rychlost proudícího vzduchu dvakrát větší, než rychlost samotného vozidla. Díky tomuto zvýšení rychlosti dochází v oblasti mezi bodem S_1 a S_2 k odtržení proudu vzduchu. Čím je rychlost vyšší, tím blíže k bodu S_2 dojde k odtržení. Je-li bod odtržení roven bodu S_2 , nemá již další zvyšování rychlosti vliv na polohu tohoto bodu. Odtržení má za následek vznik turbulentního proudění, což vede ke zvýšení aerodynamického odporu i vztlaku. [1]



Obr. 14 Obtékání vzduchu a rozložení tlaku okolo pneumatiky [1]

U osobních automobilů generují přední kola přibližně 65 % z celkového aerodynamického odporu kol. To je zapříčiněno tím, že kola zadní nápravy jsou v zákrytu kol předních. Proudění vzduchu a rozložení tlaku na kolech obou náprav je vyobrazeno na Obr. 15. [1]

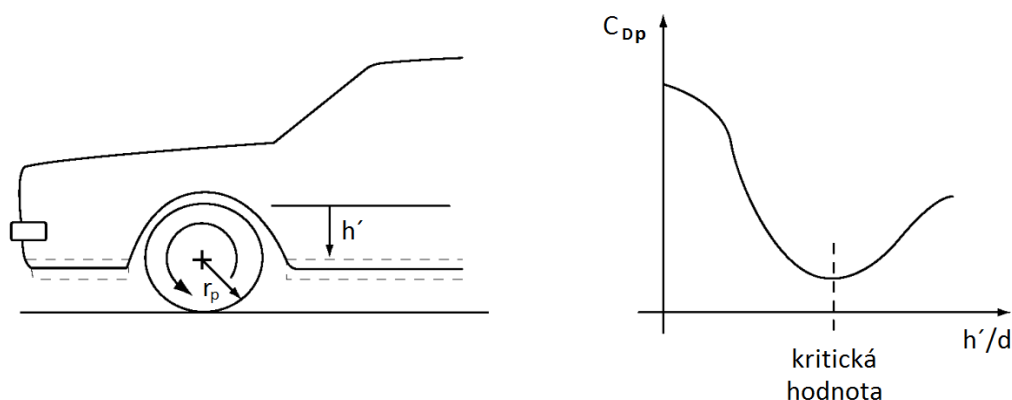


Obr. 15 Vliv proudu vzduchu na kola jednotlivých náprav [1]

Při neměnné hodnotě světlé výšky vozu roste aerodynamický odpor a vztlak spolu s rostoucím poloměrem kola. Stejný, ovšem ne tak výrazný účinek na aerodynamické síly má i zvětšující se hloubka podběhu. Při zvětšení šířky pneumatiky dochází také k nárůstu odporu a vztlaku. Pokud bude místo šířky pneumatiky zvětšen její poloměr, bude kolo při stejném objemu vytvářet větší odpor. Velikost vznikajícího odporu je ovlivněna také tvarem ramene pneumatiky a vzdáleností mezi bočními pneumatiky a patkou disku. [1]

Na Obr. 16 je znázorněn vliv poměru veličiny h' vůči průměru kola d na velikost součinitele aerodynamického odporu kol C_{Dp} . Veličina h' představuje vzdálenost mezi vrcholem kola

a spodní částí prahu. Při dosažení kritického poměru h'/d je dosaženo nejmenšího součinitele odporu kol. Kritický poměr je roven hodnotě přibližně 0,75. [1]



Obr. 16 Vliv poměru h'/d na aerodynamický odpor kola [1]

Z hlediska snížení aerodynamického odporu je vhodné využívat plný kolový disk. Jsou-li v disku otvory, dochází ke vzniku vírů a zvýšení aerodynamického odporu. Ovšem pro účinné chlazení brzd je potřeba, aby byla otevřená plocha disku co největší.

Důležitý vliv na hodnotu odporu a vztlaku má rotace kol. Při testování v aerodynamickém tunelu se ukazuje, že rotující kola mají nižší koeficient odporu, než kola stojící, a to přibližně o 0,02. U rotujících kol vzniká Magnusův jev, který říká, že při obtékání tekutiny okolo rotujícího tělesa vzniká boční síla. Tato síla působí kolmo na směr proudění a směřuje do vozovky, čímž snižuje vztlakovou sílu, takže rotující kola mají nižší i koeficient vztlaku. [3]

1.5 AKTIVNÍ AERODYNAMICKÉ PRVKY

Aktivními aerodynamickými prvky se rozumí takové prvky, které mění svou polohu v závislosti na aktuálních podmínkách jízdy, a tím ovlivňují aerodynamické parametry vozidla. Nejčastěji se jako aerodynamické prvky konstruují pohyblivé zadní a přední spojler, aerodynamické brzdy a uzavíratelné průduchy či kanály. Tyto prvky jsou ovládány elektronicky pomocí řídicí jednotky.

1.5.1 AKTIVNÍ ZADNÍ SPOJLER

Hlavním úkolem aktivního zadního spojleru je vytvořit maximální přítlak na zadní nápravě při rychlé jízdě či zatáčení. Současně může sloužit i jako aerodynamická brzda. Aktivní zadní spojler využívá velké množství automobilů kategorie supersport.

Zadní spojler vozu Ford GT druhé generace využívá profilu křídla. V případě, kdy je nutno minimalizovat jízdní odpor, tvoří křídlo součást karosérie. Při požadavku maximálního přítlaku na zadní kola se křídlo vysouvá nad úroveň karosérie. Při brzdění dochází k jeho naklopení a křídlo slouží jako aerodynamická brzda. Tyto režimy jsou zachyceny na Obr. 17. Uvnitř křídla je navíc ukrytá malá vačka, která svým natáčením mění křídlový profil. Křídlo je tak schopno generovat různé hodnoty vztlaku a odporu. Vačka se natáčí v závislosti na rychlosti jízdy a jízdních podmínkách. [24]



Obr. 17 Polohy křídla Fordu GT – minimální odpor, maximální přítlak, brzdění [25]

Konstrukční řešení, kdy zadní spojler v zasunutém stavu tvoří součást karosérie, se u silničních automobilů vyskytuje nejčastěji. Využívá ho například Lexus LFA modelový rok 2012. Spojler se vysouvá po překročení rychlosti 80 kilometrů za hodinu při sportovním režimu jízdy a při režimu „auto“ při 130 kilometrech za hodinu. K zasunutí dojde při poklesnutí rychlosti pod 40 kilometrů za hodinu, a to u obou režimů. [26]

Spojler druhé generace vozu Porsche Panamera Turbo také splývá s karosérií, čímž minimalizuje aerodynamický odpor vozu a zároveň nenarušuje jeho vzhled. Ovšem šířka zádi vozu nebyla dostatečná pro požadovanou šířku spojleru. Proto je spojler Panamery složen ze tří částí, z nichž se dvě rozevrou do stran po vysunutí spojleru, čímž prodlouží jeho šířku, viz Obr. 18. Spojler tak dokáže generovat požadovanou hodnotu přítlaku na zadních kolech. [27]



Obr. 18 Aktivní zadní spojler vozu Porsche Panamera Turbo [27]

Aktivní zadní spojler jsou tedy nejčastěji zakomponovány do karosérie a při jízdě vyšší rychlostí se vysouvají, aby zajistily potřebný přítlak na zadní nápravě. Často slouží také jako aerodynamická brzda.

1.5.2 AKTIVNÍ AERODYNAMICKÁ BRZDA

Aerodynamické brzdy snižují rychlost vozidla pomocí zvýšení aerodynamického odporu. Hlavní výhodou tohoto aerodynamického prvku je skutečnost, že síla generovaná aerodynamickým odporem se nepřenáší do stopy pneumatiky. Velikost této brzdné síly tedy není omezena maximální hodnotou síly, kterou je pneumatika schopna přenést. Aerodynamické brzdy bývají většinou umístěny na zadní části karosérie, protože kromě aerodynamického odporu generují také přítlak, který je kvůli klonění automobilu při brzdění výhodné přenášet především na zadní nápravu. V podstatě se jedná o výklopnou desku, která se vyklání dle potřeby až o 90 stupňů vůči karosérii. Tato deska bývá součástí karosérie. Jako aerodynamická brzda často slouží i aktivní zadní spojler. Na Obr. 19 je zachycena aerodynamická brzda vozu Mercedes-Benz C112 a Bugatti Veyron.



Obr. 19 Aerodynamická brzda vozu Mercedes-Benz C112 a Bugatti Veyron [33][34]

1.5.3 AKTIVNÍ PŘEDNÍ SPOJLER (AIR DAM)

Přední spojler bývá umisťován na spodní část předního nárazníku. Vzduch proudící ke spojleru je odkláněn, což způsobí snížení tlaku pod přední částí vozidla a také snížení tlaku pod kapotou. Tento jev minimalizuje vztakovou sílu na přední nápravě a zlepšuje chlazení motoru. [1]

U aktivního předního spojleru lze změnou jeho vzdálenosti od vozovky ovlivňovat množství vzduchu, které proudí pod přední část vozidla. Velkou výhodou představuje možnost spojler zcela zasunout do karosérie, a tím zabránit jeho poškození při přejíždění nerovností nebo při parkování. Ve vysokých rychlostech pak může být přední spojler zcela vysunut.

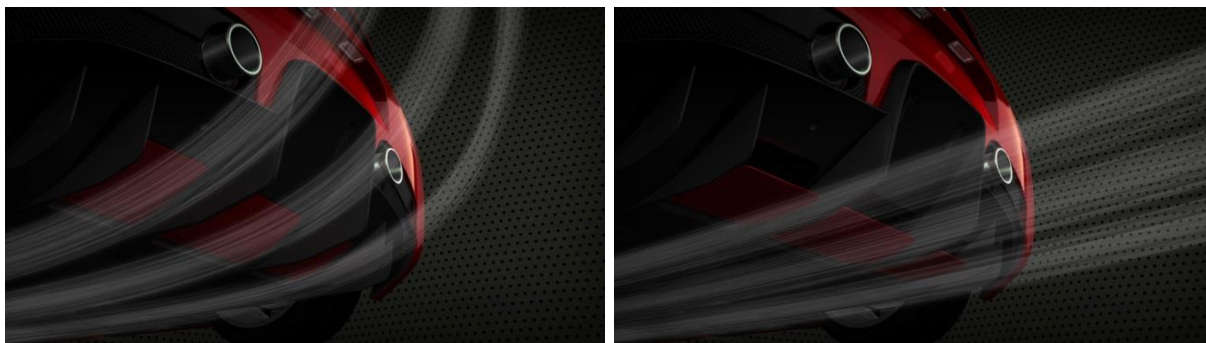
1.5.4 AKTIVNÍ PODVOZKOVÉ PANELE

Jako aktivní prvky se v případě sportovních automobilů konstruuji také podvozkové panely. Panely jsou tvarovány tak, aby vytvořily požadované ovlivnění proudu vzduchu pod vozidlem. Většinou jsou uchyceny na jedné hraně otočně a dle potřeby se pomocí elektromotoru vyklápí. Při jízdě vysokou rychlostí jsou panely zcela vyklopeny a při nízkých rychlostech jsou opět sklopeny, aby nedošlo k jejich mechanickému poškození o nerovnosti na vozovce.

1.5.5 AKTIVNÍ ZADNÍ DIFUZOR

Zadní difuzor je umístěn na podvozku v zadní části vozidla a směrem k zadní hraně vozu se rozšiřuje. Difuzor jednak vytváří vhodný tvar profilu podvozku, čímž urychluje vzduch proudící pod automobilem a také zpomaluje proudění vzduchu vystupující z oblasti pod vozidlem, a tím zabraňuje nadměrnému odtrhávání vzduchu a vzniku vírů v oblasti úplavu, kde je rychlost proudění malá. Tím zvyšuje přitlak na zadní nápravě.

Aktivní difuzor využívá například Ferrari 458 Speciale. Samotný difuzor je nepohyblivý, pohybují se pouze přidavné klapky. Jsou-li klapky zdvihnuty, proud vzduchu proudící přes difuzor není nijak ovlivněn a difuzor plní svoji funkci, viz Obr. 20 vlevo. Ovšem jsou-li klapky sklopeny, vytváří v zadní části vozu povrch vodorovný s vozovkou, viz Obr. 20 vpravo. Vzduch se před koncovou hranou vozu nestáčí a proudí přímo, což vede ke snížení aerodynamického odporu. Tento režim je vhodný pouze pro rychlou přímou jízdu. [9]



Obr. 20 Ferrari 458 Speciale – vlevo zdvihnuté klapky, vpravo sklopené klapky [9]

1.5.6 AKTIVNÍ PŘEDNÍ MASKA

Výrazného snížení aerodynamického odporu lze dosáhnout uzavíráním čelní masky vozidla. Uzavřením masky se částečně omezí přístup vzduchu ke chladiči a do motorového prostoru. Tento systém dnes využívají téměř všichni přední automobiloví výrobci. Otvory v masce jsou uzavírány pomocí natáčecích či vysouvacích elementů, které jsou ovládány elektromotorem. Impulz k uzavření masky dává řídicí jednotka na základě údajů o teplotě motoru.

Tento systém může být viditelný či skrytý. Uviditelného systému se uzavírá samotná přední maska vozu, viz Obr. 21 Mercedes-Benz C-Class. U skrytého systému je přední maska pasivní a pod ní se nachází mechanismu s klapkami, viz Obr. 21 Dodge RAM. Viditelný systém má nižší součinitel aerodynamického odporu a také nižší hmotnost, ovšem je náročnější na konstrukci.

Další nespornou předností tohoto mechanismu je, že v chladném prostředí motor rychleji dosáhne pracovní teploty.



Obr. 21 Aktivní maska vozu Mercedes-Benz C-Class a Dodge RAM [35][36]

1.5.7 AKTIVNÍ AERODYNAMICKÉ KLAPKY

Dalším aktivním aerodynamickým prvkem mohou být aerodynamické klapky.

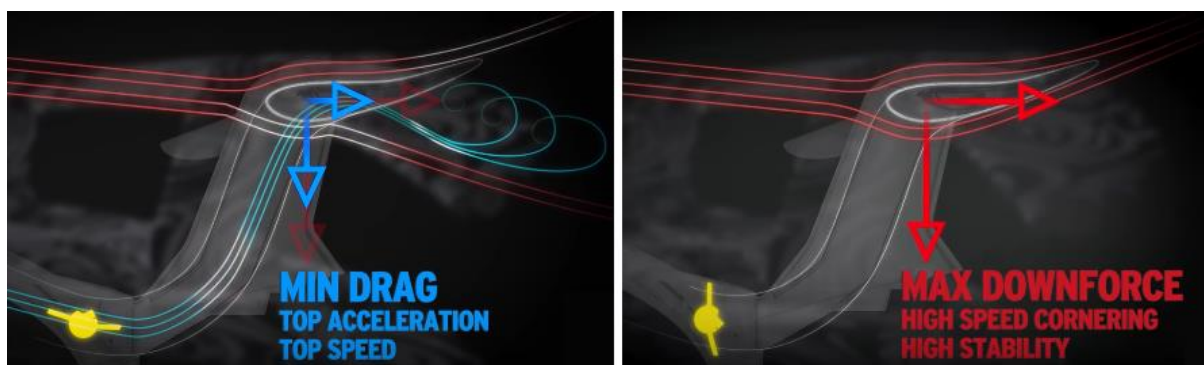
Aerodynamické klapky využívá například Pagani Huayra. Dvě klapky jsou umístěny na přední části vozu a další dvě potom na části zadní viz Obr. 22. Klapky jsou ovládány nezávisle na sobě a hlavní přínos mají při zatáčení. Při průjezdu zatáčkou vytváří klapky na vnitřních kolech přítlak a tím zvyšují přenositelnou boční sílu na těchto kolech. Při změnách

rychlosti jízdy dle potřeby usměrňují proud vzduchu a ovlivňují odporovou a vztlakovou sílu působící na vůz. Při brzdění slouží zadní klapky jako aerodynamická brzda. [37]



Obr. 22 Aerodynamické klapky vozu Pagani Huayra [37]

Také Lamborghini nedávno představilo svoji technologii s názvem Aerodinamica Lamborghini Attiva, která využívá aktivní aerodynamické klapky. Model Huracán je vybaven klapkami, které upravují proudění vzduchu v oblasti předního nárazníku a také kolem zadního křídla. Klapka v předním nárazníku určuje množství vzduchu proudícího pod vozidlo. Při jejím otevření se pod automobil dostává více vzduchu, než když je klapka uzavřená. Dvojice klapek ovlivňující proudění kolem křídla je uložena v dutých podporách zadního křídla. Při jejich otevření je přiváděn proud vzduchu na spodní plochu křídla, což má za následek minimalizaci aerodynamického odporu, viz Obr. 23 vlevo. Při uzavření klapek křídlo generuje maximální hodnotu přítlaku, viz Obr. 23 vpravo. [28]

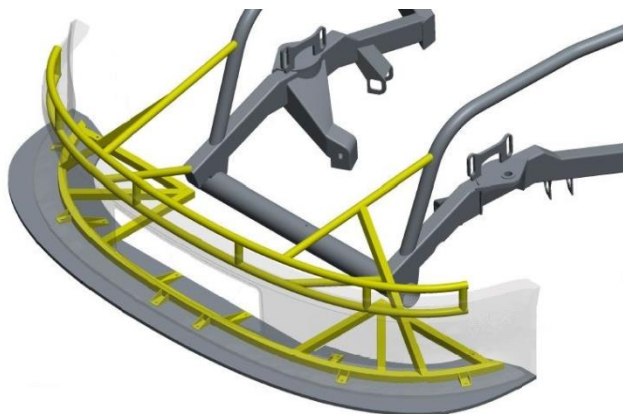


Obr. 23 Aerodynamická klapka u křídla vozu Huracán – vlevo otevřená, vpravo uzavřená [28]

Klapky umístěné na podvozku vozu se řadí mezi podvozkové panely. Nejčastěji se užívají dvě podvozkové klapky, které jsou umístěny před předními koly. Tento systém využívá například McLaren P1, jehož klapky se mohou sklonit až o 60 stupňů. [28]

1.5.8 AKTIVNÍ PŘEDNÍ SPLITTER

Splitter je plochý kus materiálu, který je připojen ke spodní hraně předního nárazníku rovnoběžně s vozovkou, viz Obr. 24. Jeho úkolem je generovat zápornou vztlakovou sílu na přední nápravě a tím zvýšit stabilitu řízení. Na horní straně splitteru působí během jízdy větší tlak, než na straně spodní a vytváří se přítlak. Splitter se využívá zejména u závodních automobilů.



Obr. 24 Konstrukce splitteru a jeho umístění na vozech NASCAR [12][38]

Aktivní splitter se může vysouvat a zasouvat z předního nárazníku, čímž mění svou plochu a ovlivňuje velikost přítlaku na přední nápravě. Tato konstrukce je ovšem značně náročná a využívá se zatím jen experimentálně. [11]

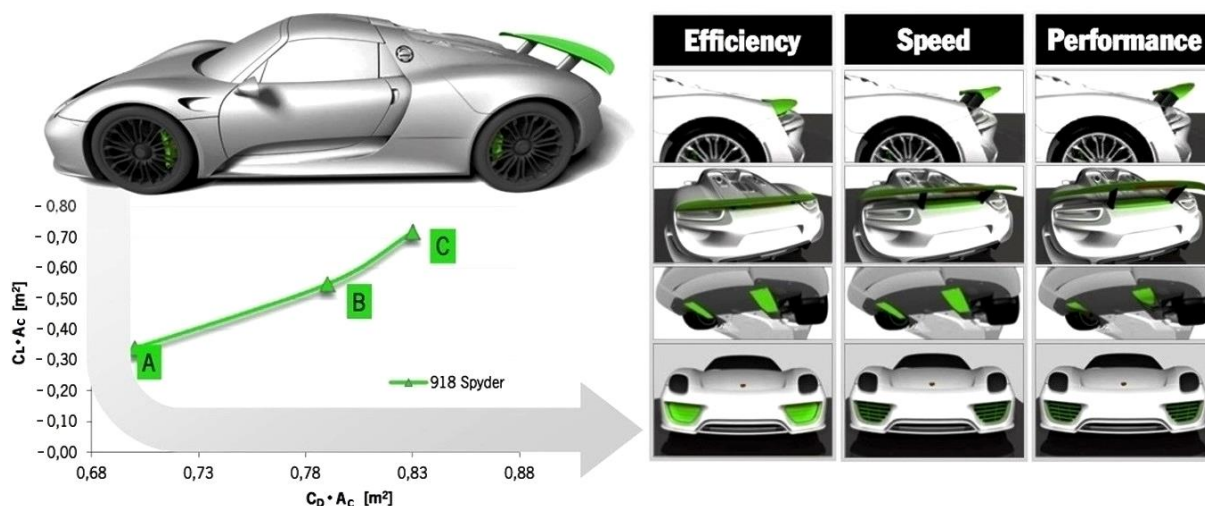
Výjimku tvoří nová Alfa Romeo Giulia Quadrifoglio. Tento automobil je dle výrobce jediným osobním sériovým vozem typu sedan, který je vybaven aktivním splitterem. Ve výchozí pozici je splitter součástí předního nárazníku a generuje tak minimální odpor, viz Obr. 25 vlevo. Při zatáčení či brzdění se splitter vysune a vytváří přítlak o hodnotě až 100 kilogramů, viz Obr. 25 vpravo. [29]



Obr. 25 Splitter vozu Alfa Romeo Giulia Quadrifoglio – vlevo zasunut, vpravo vysunut [30]

1.5.9 SYSTÉMY AKTIVNÍ AERODYNAMIKY

Výše uvedené prvky automobilky často kombinují a vytvářejí tak systémy aktivní aerodynamiky. Příkladem takového systému může být Porsche Active Aerodynamic (PAA). Princip jeho funkce je zobrazen na Obr. 26. PAA využívá model 918 Spyder. Vůz může pracovat ve třech různých jízdních módech. Prvním z nich je mód zajišťující maximální efektivitu jízdy (efficiency). V tomto režimu je kladen důraz na minimalizaci aerodynamického odporu. Křídlo je zasunuto, podvozkové klapky jsou uzavřeny, stejně jako kanál přivádějící vzduch k brzdám. Tento stav je v grafu označen jako bod A. Druhým módem je režim maximální rychlosti (speed), v grafu zaznačen jako bod B. V toto režimu je kladen důraz jak na snížení aerodynamického odporu, tak i na zvýšení generovaného přítlaku. Křídlo je vysunuto, ale není naklopeno, klapky jsou uzavřeny a kanál je otevřen. Třetí režim maximálního výkonu (performance) je zaměřen na maximální možnou hodnotu přítlaku. Křídlo je vysunuto a naklopeno, klapky i kanál jsou otevřeny. Tento stav reprezentuje bod C. Graf zobrazuje hodnoty koeficientu odporu (osa x) a koeficientu vztlaku (osa y) pro jednotlivé režimy. Oba koeficienty jsou násobeny čelní plochou vozu. [31]

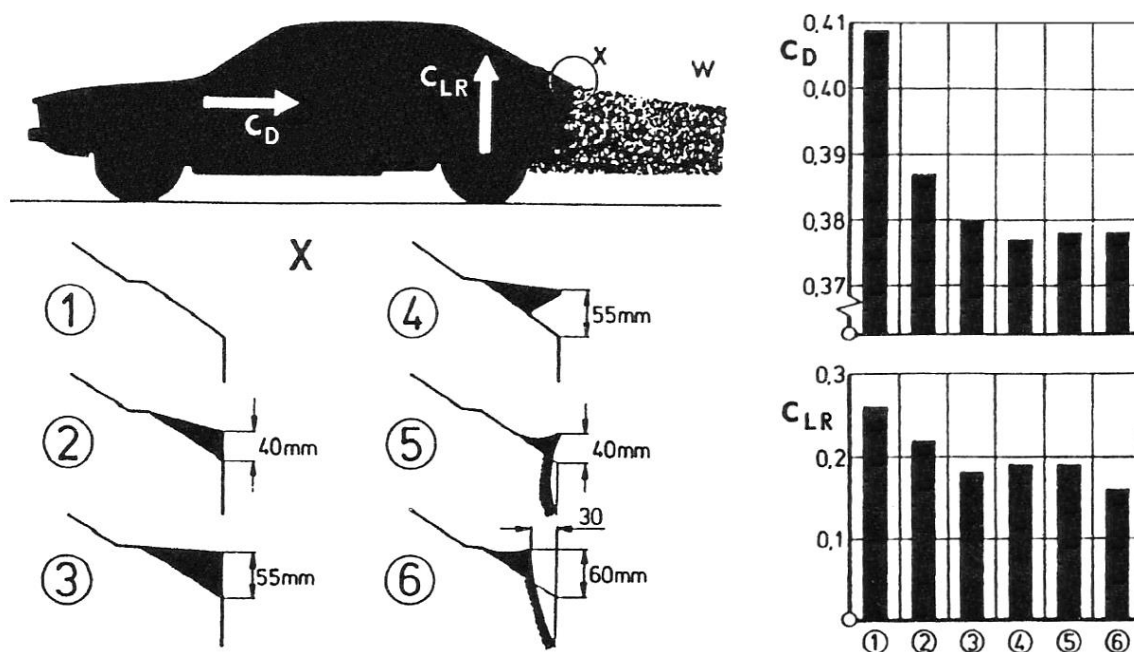


Obr. 26 Porsche Active Aerodynamic [32]

1.6 ZADNÍ (ZÁĎOVÝ) SPOJLER

Primárním úkolem zadního spojleru může být buď snaha o maximální snížení aerodynamické odporové síly působící na vozidlo, anebo snaha o snížení aerodynamické vztlakové síly, a to především na zadní nápravě.

Pro snížení aerodynamického odporu automobilu upravuje spojler proudění vzduchu v zadní části vozu, kde dochází k odtržení proudění, a tím redukuje vznik vírů za vozidlem. Druhotnou funkcí tohoto typu spojleru bývá také redukce vznikajícího vztlaku na zadní nápravě. Tvar spojleru je závislý na konkrétní podobě proudění vzduchu přes zadní část. Tento typ spojleru většinou bývá po celé své délce spojen s karosérií. Obr. 27 ukazuje možné typy provedení spoileru na vozidle Volkswagen. [2]

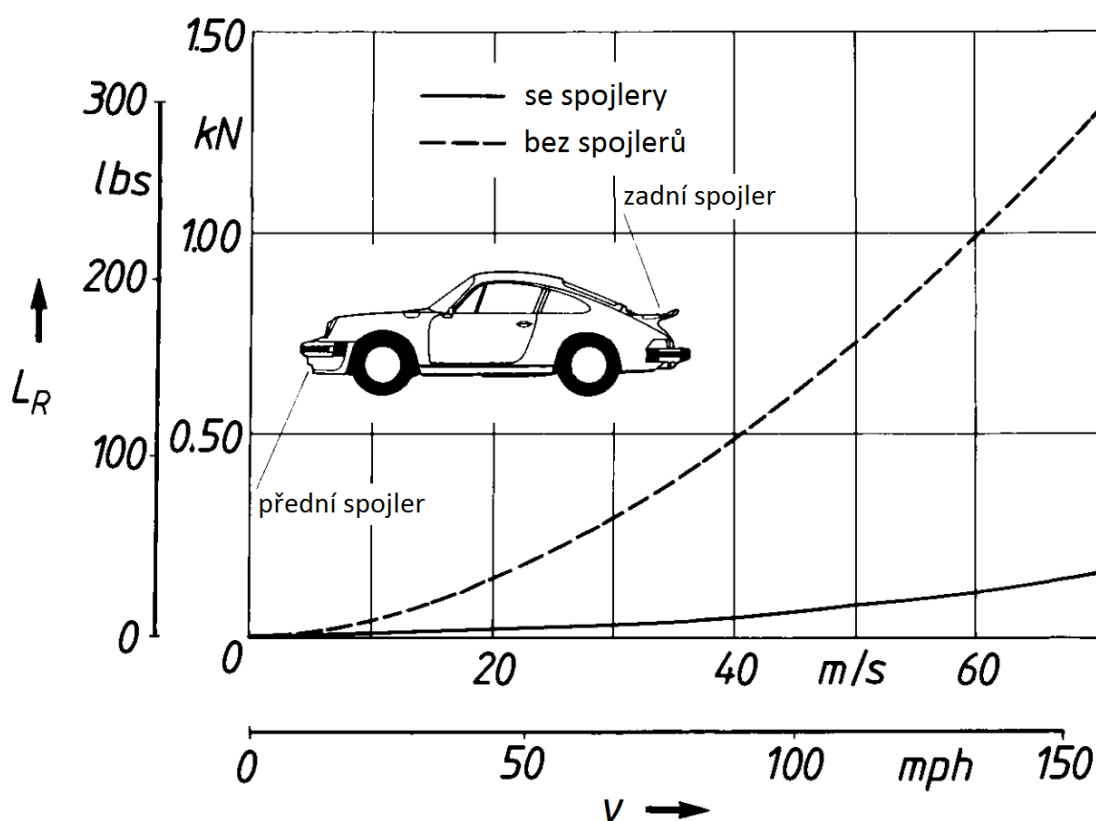


Obr. 27 Vliv tvaru spojleru na aerodynamický odpor a vztlak na zadní nápravě u vozidla VW [2]

Spojler, jehož hlavní funkcí je redukovat vznikající vztlakovou sílu, mívá různé tvary. Největších hodnot přítlaku dosahuje spojler využívající obráceného profilu leteckého křídla. Spojler s tímto profilem se nazývá automobilové křídlo. Křídlo musí být umístěno v dostatečné vzdálenosti od karosérie vozu, aby mohl proudit dostatek vzduchu po jeho spodní části. Standardně bývá křídlo upevněno na dvou podporách.

1.6.1 VLIV ZADNÍHO SPOJLERU NA HODNOTU PŘÍTLAKU NA ZADNÍ NÁPRAVĚ

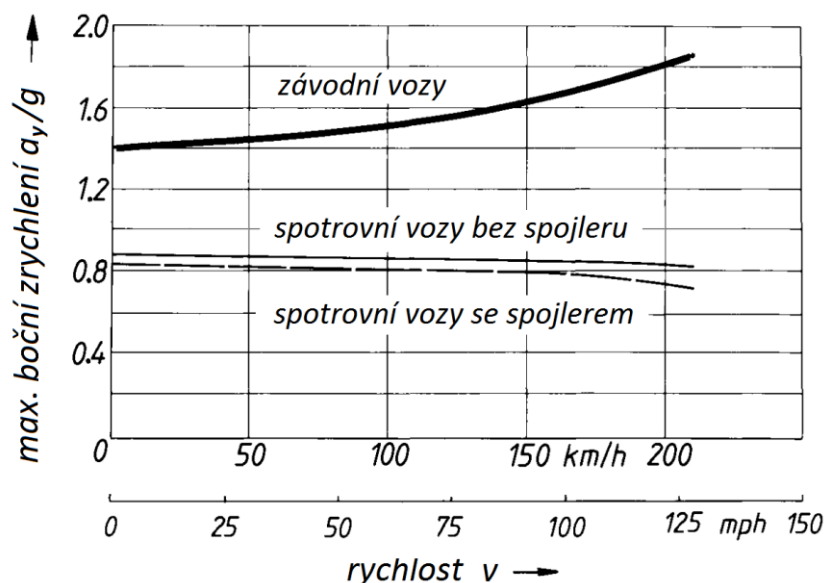
Na Obr. 28 je zobrazen vliv předního a zadního spojleru na velikost vztlakové síly na zadní nápravě během zvyšování rychlosti jízdy vozidla Porsche 911 Carrera. Pokud není automobil vybaven těmito aerodynamickými prvky, síla značně narůstá. Vztlaková síla narůstá i při použití spojlerů, ovšem značně pozvolněji. [3]



Obr. 28 Vliv aerodynamických prvků na součinitel vztlaku zadní nápravy [14][3]

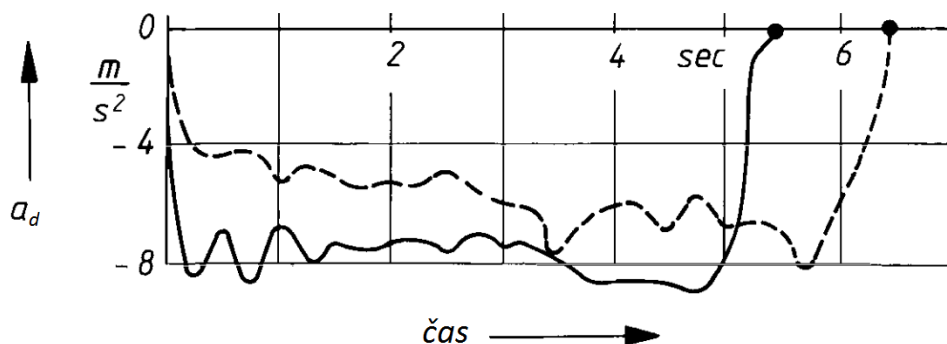
1.6.2 VLIV ZADNÍHO SPOJLERU NA JÍZDNÍ STABILITU VOZU

Obr. 29 zobrazuje výsledky silničního testu, při kterém se měřil přítlak vznikající na zadní nápravě sériového sportovního automobilu bez a při použití zadního spojleru. Experiment ukazuje, že při využití spojleru dochází ke zvýšení maximálního bočního zrychlení, které může působit na automobil při průjezdu zatáčkou bez ztráty přilnavosti mezi pneumatikou a vozovkou. Spojler tak umožňuje projet zatáčku vyšší rychlostí. Pro vůz osazený spojlerem také klesá hodnota maximálního bočního zrychlení při vysokých rychlostech pozvolněji. [3]



Obr. 29 Závislost maximálního bočního zrychlení na rychlosti jízdy [14][3]

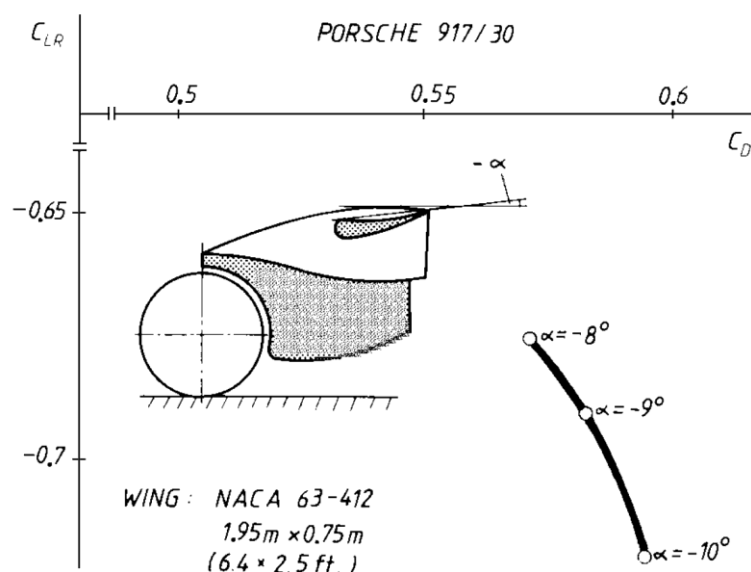
Zvýšený přítlak na zadních kolech také zkracuje brzdnou dráhu vozidla. Při brzdění dochází ke klopení vozu na přeni část a zadní náprava je odlehčována. Při využití přítlaku generovaného spojlerem je možno zadní kola přitlačit více k vozovce, a tím umožnit přenos větší brzdné síly na vozovku. Změřený průběh zpomalení a_d při brzdění v závislosti na čase je zobrazen na Obr. 30. Plná čára představuje vůz, který byl osazen zadním spojlerem. Rychlost na počátku experimentu dosahovala 145 kilometrů za hodinu. Vůz se spojlerem zastavil po přibližně 5,5 sekundách, zatímco vůz bez spojleru brzdil na nulovou rychlost o jednu sekundu déle. [3]



Obr. 30 Průběh zpomalení při brzdění pro vůz se spojlerem a bez spojleru [14][3]

Při využití zadního spojleru pro generování záporné vztlačkové síly dochází vždy k nárůstu aerodynamického odporu vozidla. Náběžná hrana křídla působí jako překážka proudícímu vzduchu. Při snižování součinitele vztlačku tak dochází k nárůstu součinitele odporu. Proto se u sportovních vozidel často pracuje s poměrem C_L/C_D .

Velikost vznikajícího přítlaku na zadní nápravě a celkového odporu v závislosti na úhlu náběhu automobilového křídla α pro Porsche 917/30 je zobrazena na Obr. 31. Úhel náběhu představuje úhel, o který je profil křídla vychýlen vůči přicházejícímu proudu vzduchu. S rostoucím úhlem náběhu roste velikost generovaného přítlaku ale také velikost aerodynamického odporu, protože proudícímu vzduchu je vystavena větší plocha křídla.



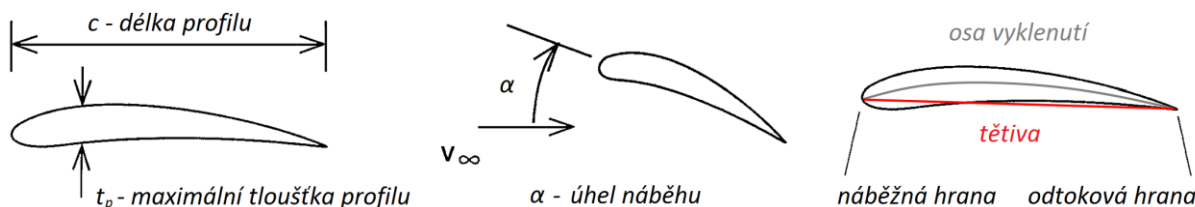
Obr. 31 Vliv úhlu náběhu křídla na aerodynamické koeficienty [3]

1.6.3 KŘÍDLO

V této části je uvažováno klasické letadlové křídlo, které generuje vztlak, na rozdíl od automobilového křídla, které je oproti letadlovému obráceno a generuje tak přítlak. Proto bude v této kapitole nahou zvyšovat kladnou vztlakovou sílu.

VELIČINY PROFILU KŘÍDLA

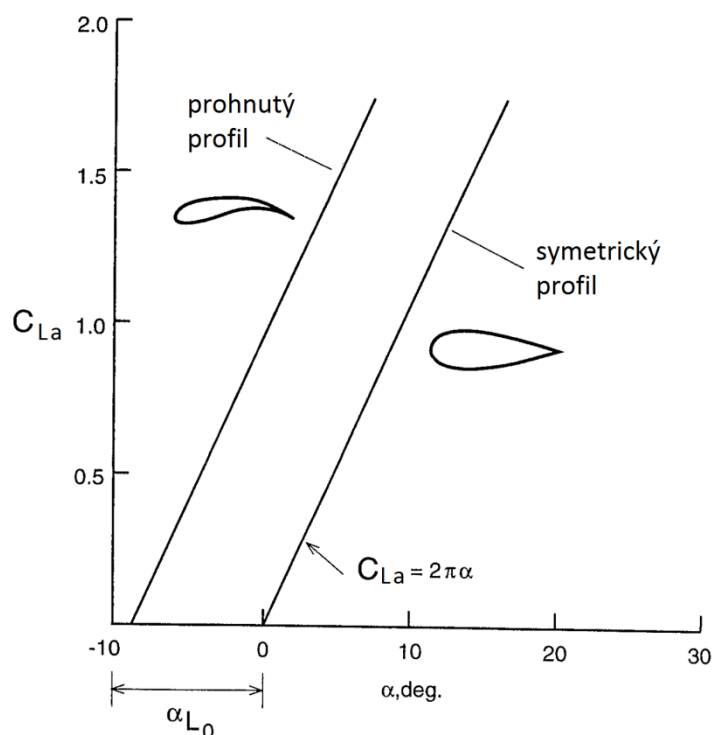
Na Obr. 32 jsou definovány veličiny, které charakterizují geometrii profilu křídla. [4]



Obr. 32 Názvosloví profilu křídla [4]

VLIV ÚHLU NÁBĚHU

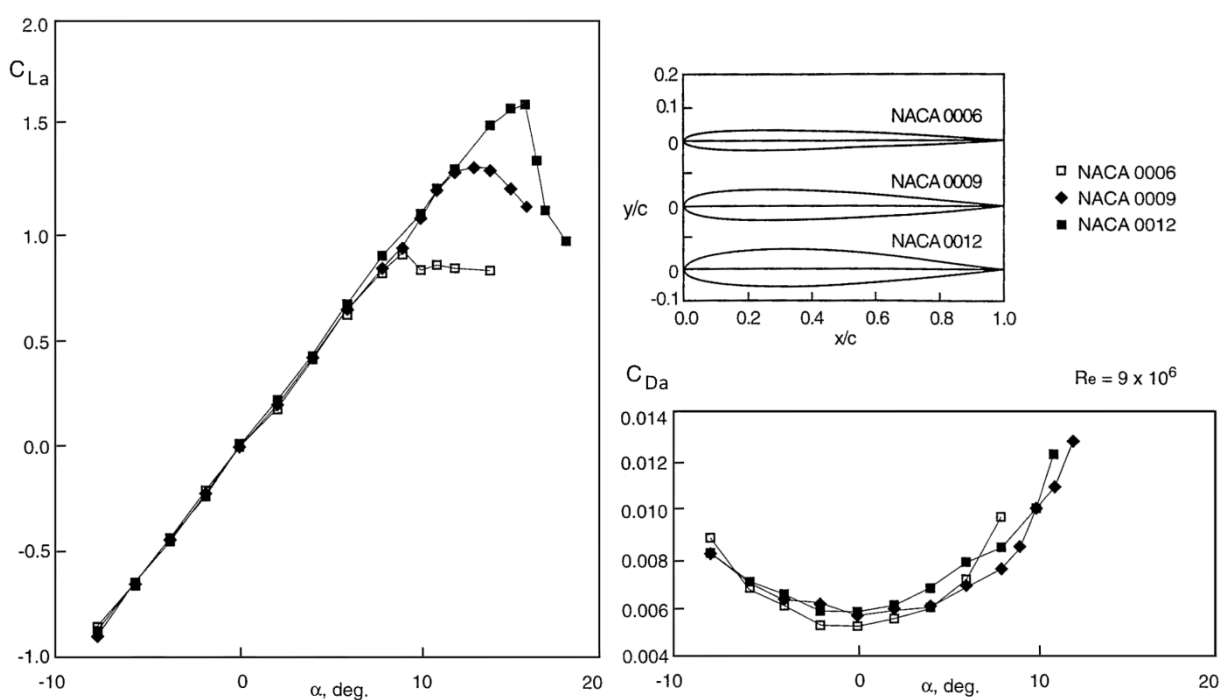
Závislost aerodynamického součinitele vztlaku profilu křídla C_{La} na úhlu náběhu popisuje lineární funkce se směrnici přímky $2 \cdot \pi$, viz Obr. 33. V případě symetrického profilu křídla je při nulovém sklonu náběžné hrany nulový součinitel vztlaku. Vyklenuté, tedy nesymetrické křídlo, generuje vztlak i při nulovém úhlu α . Velikost tohoto vztlaku je závislá na prohnutí profilu. Vliv prohnutí je charakterizován veličinou α_{L0} , která určuje horizontální posun lineární přímky závislosti úhlu náběhu na součiniteli vztlaku profilu křídla. [4]



Obr. 33 Vliv úhlu náběhu na koeficient vztlaku profilu křídla [4]

VLIV TLOUŠTKY PROFILU

Obr. 34 zobrazuje závislost součinitele vztlaku profilu křídla a součinitele odporu profilu křídla C_{Da} na úhlu náběhu pro různé tloušťky symetrického profilu křídla. Profil NACA 0006 představuje nejmenší tloušťku křídla, NACA 0012 potom tu největší. [4]



Obr. 34 Závislost součinitele vztlaku a odporu profilu křídla na úhlu náběhu [4]

Nejtenčí profil NACA 0006 dosahuje nejmenší maximální hodnoty součinitele vztlaku, ovšem při dosažení maxima již součinitel neklesá tak razantně jako v případě profilu NACA 0009 a 0012. [4]

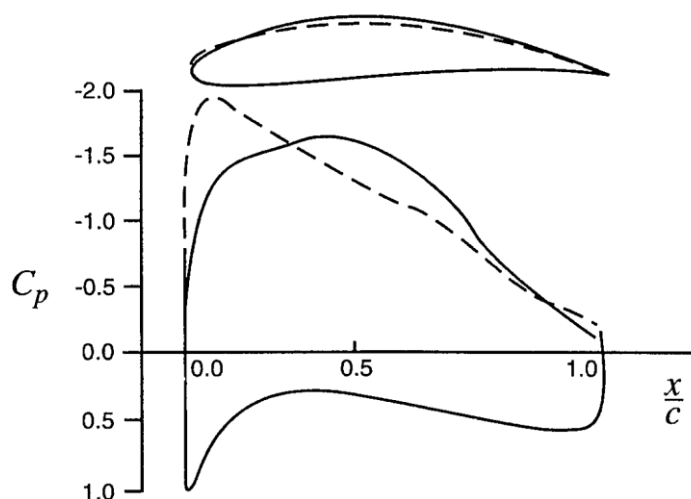
Při nulovém úhlu náběhu dosahuje tenký profil menší hodnoty součinitele odporu, ovšem se zvyšujícím se úhlem náběhu dochází vlivem ostré náběžné hrany tenkého profilu k razantnějšímu zvyšování odporového součinitele. Při větších úhlech α má z hlediska odporu výhodnější vlastnosti tlustší profil. [4][3]

Při nulovém úhlu náběhu se na profilu vytváří nejužší mezní vrstva a vzniká tedy nejmenší aerodynamický odpor. S rostoucím úhlem náběhu roste také tloušťka mezní vrstvy a odpor se zvyšuje. [4]

ODTRŽENÍ PROUDU VZDUCHU

Výše popsané předpoklady platí pouze v případě, že nedochází k odtržení proudy vzduchu na horní křivce profilu křída. Při odtržení dochází k poklesu podtlaku na horní straně profilu, což má za následek snížení celkové vztlakové síly. Odtržení také způsobuje značný nárůst aerodynamického odporu. K odtržení může dojít při zvyšování úhlu α , nebo i při konstantním či nulovém úhlu náběhu. O tom, v jakém místě profilu a jestli vůbec k odtržení dojde, rozhoduje především tvar profilu křídla a také rychlost a směr proudění vzduchu. [4]

Na Obr. 35 je zobrazen rozdíl v rozložení tlaku na horní straně profilu křídla v případě dvou různých zakřivení. U čerchovaně zobrazeného profilu dochází k ostrému nárůstu minimálního tlaku velmi blízko náběžné hrany. Hodnota tlaku je zde reprezentována tlakovým koeficientem. V místě tohoto minima dochází k odtržení vrstvy vzduchu od povrchu, což má za následek zvýšení aerodynamického odporu. Pro profil zobrazený plnou čarou je odpor menší, jelikož minimálního tlaku je dosaženo pozvolněji a k odtržení proudy vzduchu od křídla dochází dál od náběžné hrany. Přitom oba dva profily generují stejnou hodnotu vztlakové síly. [4]



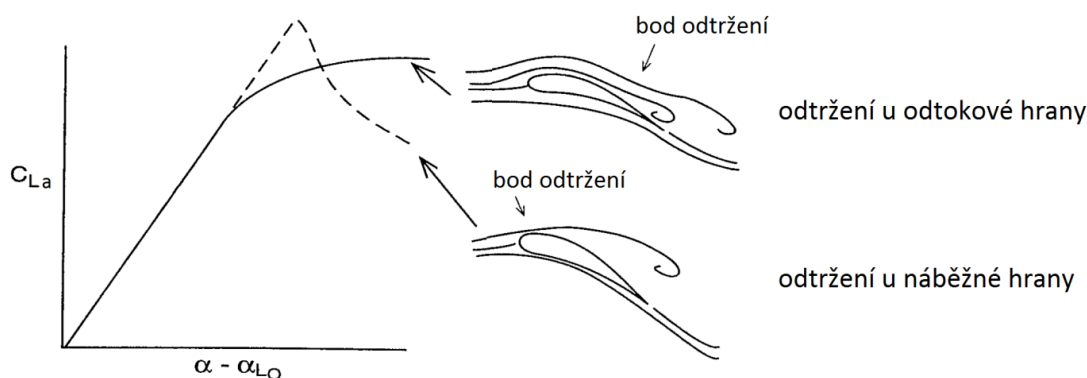
Obr. 35 Vliv tvaru profilu na průběh tlaku nad křídlem [4]

Tlakový koeficient C_p , charakterizující hodnotu tlaku na ypsilonové ose, je definován následovně [4]:

$$C_p = \frac{p_k - p_\infty}{\frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2}, \quad (21)$$

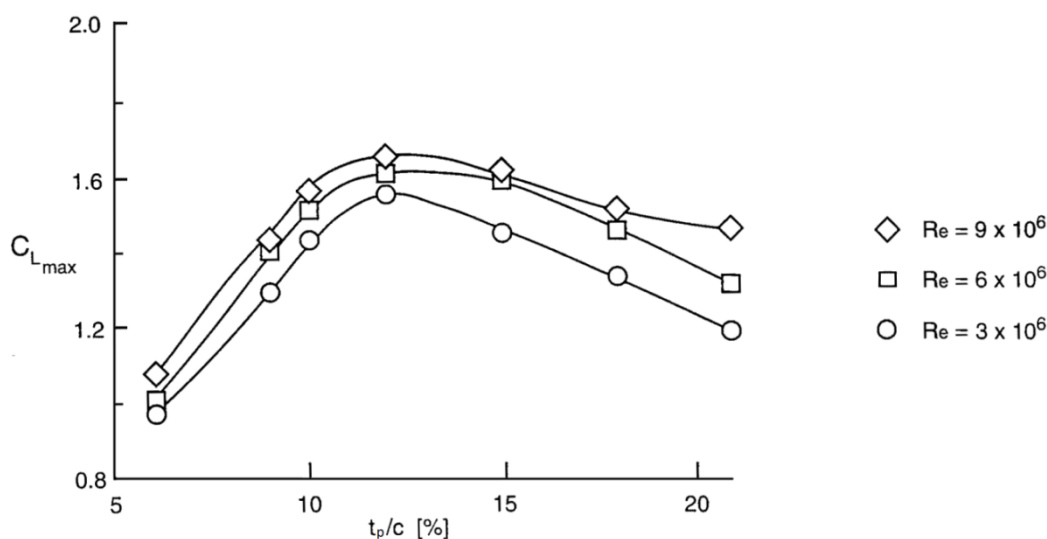
kde veličiny p_∞ a v_∞ představují tlak a rychlost neovlivněného proudu vzduchu a p_k je obecně tlak na povrchu zkoumaného objektu.

U tenkých profilů nebo profilů s ostrou náběžnou hranou dochází k odtržení proudu vzduchu náhle. Bod odtržení se nachází v přední části profilu. U profilů s větší tloušťkou a větším vyklenutím je odtržení pozvolnější a bod odtržení se nachází u odtokové hrany profilu. Obr. 36 ukazuje, jaký vliv má poloha bodu odtržení na součinitel vztlaku profilu křídla. Snahou tedy je, aby se bod odtržení nacházel co nejdále od náběžné hrany. [4]



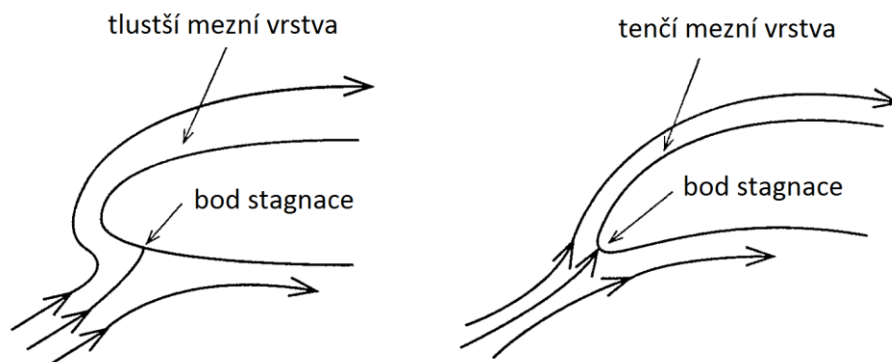
Obr. 36 Vliv polohy bodu odtržení na součinitel vztlaku profilu křídla [4]

Se vzrůstající tloušťkou profilu křídla dochází k nárůstu maximálního vznikajícího přitlaku C_{LaMAX} a také se bod odtržení posouvá směrem k odtokové hraně. Jak je ovšem patrné z Obr. 37, tak nárůst maximálního přitlaku se zastavuje na hodnotě, při které je maximální tloušťka profilu rovna 12 % délky profilu křídla. Tloušťka profilu tedy má vliv na rozložení tlaku, ale ne tak velký jako zakřivení profilu nebo úhel náběhu. [4]



Obr. 37 Vliv tloušťky profilu na součinitel vztlaku [4]

Tvar náběžné hrany má vliv na velikost mezní vrstvy na horní křivce profilu. V případě statického křídla, které nemění svou polohu vůči směru proudění, je vhodné uzpůsobit náběžnou hranu tak, aby vznikala na povrchu profilu tenká mezní vrstva. Na Obr. 38 je dosaženo tenčí mezní vrstvy využitím ostřejší náběžné hrany. Ovšem v případě proměnného směru proudění vůči náběžné hraně křídla je vhodné náběžnou hranu co nejvíce zakulatit, a tím zabránit předčasnému odtržení proudu vzduchu od profilu. [4]



Obr. 38 Vliv tvaru náběžné hrany na tloušťku mezní vrstvy [4]

Jelikož u turbulentní mezní vrstvy dochází k odtržení později, než u vrstvy laminární, je snahou, aby na křídle vznikala právě turbulentní mezní vrstva. Turbulentní mezní vrstva ovšem zvyšuje aerodynamický odpor. [4]

Proto se spojlerý využívané u automobilů dělí na dvě skupiny. Jak již bylo napsáno výše, první skupina spojlerů generuje maximální přítlak a druhá minimalizuje aerodynamický odpor automobilu. První kategorie spojlerů se nejvíce využívá u silničních a sportovních vozů, které vyžadují maximální ovladatelnost a co nejkratší brzdnou dráhu. Druhá skupina je určena pro dlouhé okruhové závodění, kde rozhoduje především maximální rychlost a akcelerace vozu. Pro velké hodnoty vztlačkové síly se využívají značně vyklenuté profily, zatímco pro minimální odpor je vhodné zvolit profil méně vyklenutý. [4]

Dnes existují rozsáhlé databáze profilů křídel a také množství softwarů, pomocí kterých je možno namodelovat ideální profil spojleru. Ovšem při návrhu je nutno zahrnout i podmínky proudění vzduchu kolem křídla, které budou značně ovlivňovány polohou křídla vůči karosérii a také rychlostí jízdy.

KŘÍDLO KONEČNÉ DÉLKY

Křídlo konečné délky je takový model křídla, jehož aerodynamické parametry jsou ovlivněny přítomností bočních koncových hran. Jedná se tedy o reálný model například zadního automobilového spojleru. [4]

Hlavní parametr popisující křídlo je takzvané aspect ratio AR , pro které platí:

$$AR = \frac{b^2}{S_w}, \quad (22)$$

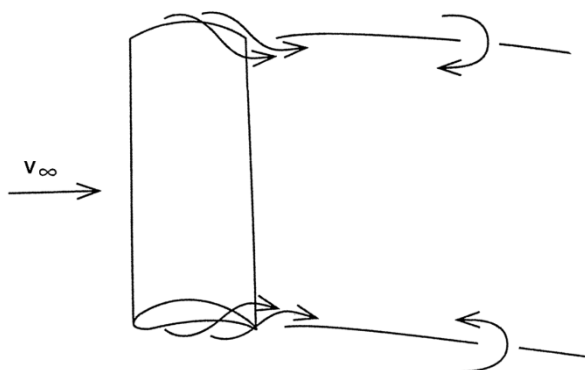
kde veličina b určuje rozpětí křídla a S_w plochu křídla. [4]

Pro obdélníkové křídlo, které se využívá u vozidel, tedy platí [4]:

$$AR = \frac{b}{c}. \quad (23)$$

Automobilové spojlerý mívají aspect ratio malé. [4]

Na boční hraně křídla se setkává nízký tlak, vznikající nad křídlem, s vysokým tlakem generovaným pod křídlem. Tento jev vyvolává vznik víru, viz Obr. 39. Víry působí na obou bočních hranách křídla a snižují celkový vztlak. Proto je nutné tomuto jevu zabránit.



Obr. 39 Vznik vírů na bočních hranách křídla [4]

Má-li křídlo velké aspect ratio, je vliv těchto vírů malý. Ovšem je-li AR malé, je pokles vztlaku na křídle značný, což je i případ automobilového křídla. [4]

VZTLAK A ODPOR KŘÍDLA

Součinitel vztlaku pro křídlo konečné délky C_{Lw} je určen následujícím vztahem [4]:

$$C_{Lw} = C_{Lw\alpha} \cdot (\alpha + \alpha_{L0}), \quad (24)$$

kde $C_{Lw\alpha}$ je součinitel vztlaku, který vzniká vlivem změny úhlu náběžné hrany [4]:

$$C_{Lw\alpha} = \frac{2 \cdot \pi}{1 + \frac{2}{AR}}. \quad (25)$$

Celkový aerodynamický součinitel odporu křídla C_{Dw} je součet součinitele indukovaného odporu C_{Dwi} a součinitele třecího odporu C_{Dw0} [4]:

$$C_{Dw} = C_{Dwi} + C_{Dw0}. \quad (26)$$

Indukovaný odpor vzniká jako reakce na vzniklý vztlak na křídle a roste s rostoucí vztlakovou silou. Jeho součinitel se určí následovně [4]:

$$C_{Dwi} = \left(\frac{1}{\pi \cdot AR} \right) \cdot C_{Lw}^2. \quad (27)$$

Indukovaný odpor také zvyšují víry, tvořící se na bočních stranách křídel. [4]

Třecí odpor vzniká třením vzduchu o povrch křídla. [4]

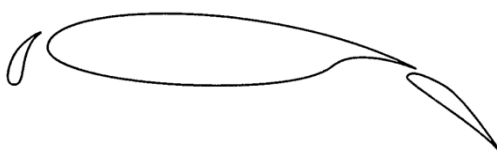
Z těchto vztahů vyplívají dva důležité závěry:

1. Vztlková síla klesá s klesajícím AR
2. Indukovaný odpor roste s klesajícím AR

ZPŮSOBY ZVYŠOVÁNÍ MAXIMÁLNÍ HODNOTY VZTLAKOVÉ SÍLY NA KŘÍDLÉ

Jak bylo zmíněno výše, zvýšení hodnoty maximálního vztlaku je možno vyvolat zvětšením plochy křídla, zvětšením vyklenutí křídla a zamezením či alespoň oddálením odtržení vzduchu od horního povrchu křídla.

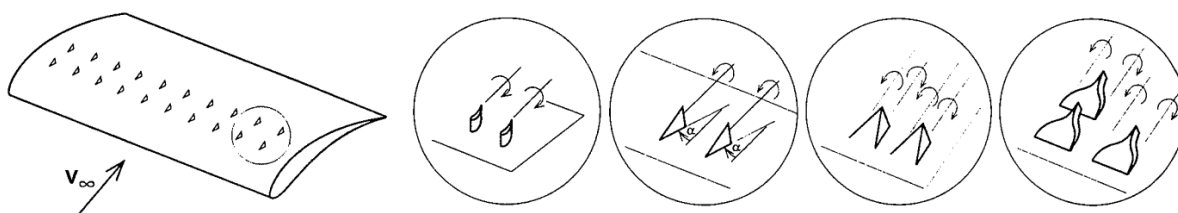
Posunutí křivky odtržení vzduchu co nejblíže odtokové hraně křídla či úplnému zabránění odtržení vzduchu se často realizuje pomocí křídla, složeného z několika elementů. Nejčastěji bývá křídlo složeno ze tří segmentů, jako je tomu na Obr. 40. Přední a zadní segment křídla se může naklápět a tím měnit sklon náběžné a odtokové hrany. Toto řešení se v automobilovém průmyslu využívá jen výjimečně. [4]



Obr. 40 Křídlo složené ze tří segmentů

V automobilovém průmyslu se častěji využívá takzvaný generátor vírů (vortex generator). [4]

Generátor je tvořen malými výčnělky na křídle, které jsou vyšší než lokální mezní vrstva. Svojí přítomností mění laminární proudění na turbulentní, což je výhodné, jelikož k odtržení vzduchu u turbulentní mezní vrstvy dochází později než u vrstvy laminární. Výčnělky se umísťují těsně před oblast odtržení a tím ji posouvají dále, nebo odtrhávání zcela eliminují. Nevýhodou této konstrukce je skutečnost, že turbulentní mezní vrstva vytváří větší odpor. Příklady možných konstrukčních provedení výčnělků jsou zobrazeny na Obr. 41. [4]



Obr. 41 Různé konstrukční provedení generátoru vírů [4]

Pro zvýšení hodnoty generovaného vztlaku se také využívá zvlněná odtoková hrana křídla. Ta vyvolává míšení oblastí nízkého tlaku nad křídlem s vysokým tlakem pod křídlem a tím redukuje odtrhávání proudu vzduchu na konci křídla.

Pro snížení aerodynamického odporu se využívá drážkovaného povrchu křídla. Drážky jsou tak malé, že jsou okem sotva viditelné a umísťují se ve směru proudění vzduchu. Jejich velikost bývá odvozena od rychlosti proudění vzduchu kolem křídla. [4]

1.6.4 AUTOMOBILOVÉ KŘÍDLO

Při návrhu křidel letadla se většinou vychází z 2D modelu rozložení tlaku kolem profilu křídla. Toto zjednodušení je možné, jelikož vzduch kolem křídla letadla proudí v otevřeném prostoru a proudění není významně narušováno dalšími částmi letounu. [4]

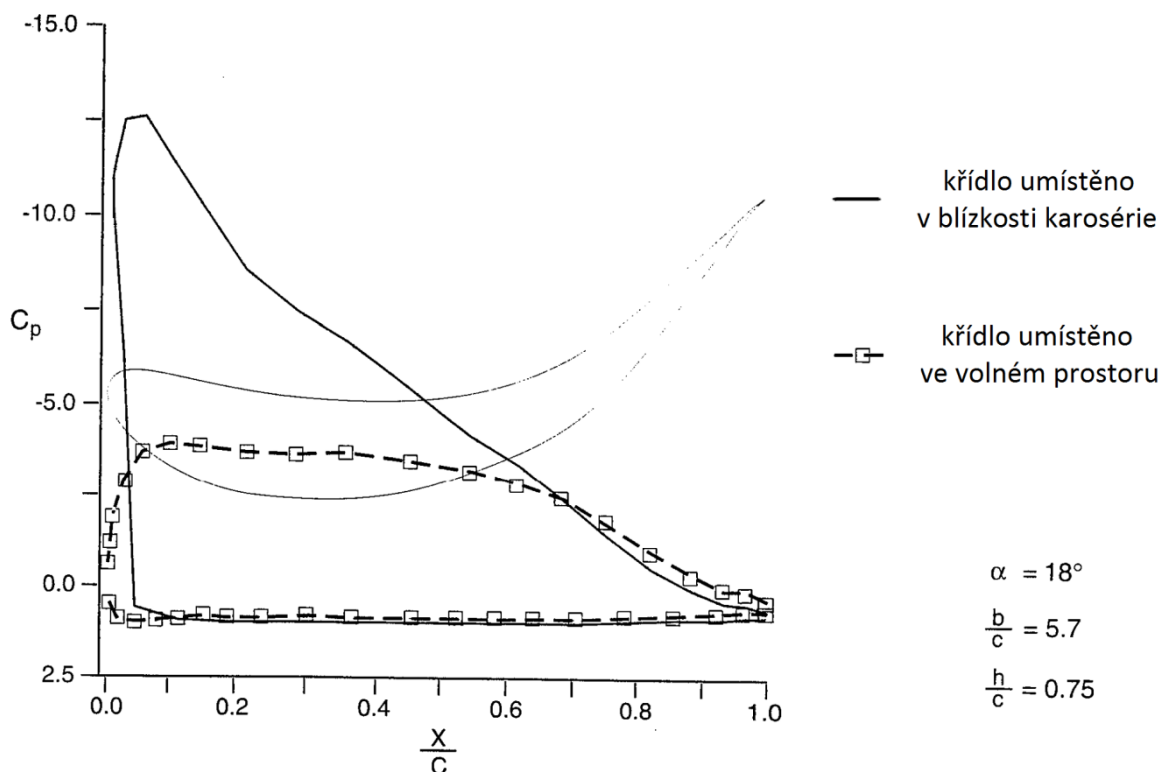
U automobilového křídla je nutno zahrnout ovlivnění vzduchu proudícího kolem křídla přítomností dalších částí automobilu. Automobilové křídlo také mívá mnohem menší aspect ratio – okolo 1,5. Z tohoto důvodu se pro návrh automobilového křídla většinou využívají 3D modely rozložení tlaku na křídle, které se získávají experimentálně či pomocí simulačních softwarů. Ovšem pro základní návrh tvaru spojleru je vhodné využít právě 2D model. [4]

Velkou databází profilů křidel disponuje americká organizace NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Tato organizace se zabývá vývojem profilů křidel již od svého založení roku 1915 a za tuto dobu vytvořila a modifikovala velké množství profilů křidel dle různých požadavků na parametry křídla.

INTERAKCE MEZI KŘÍDLEM A KAROSÉRIÍ

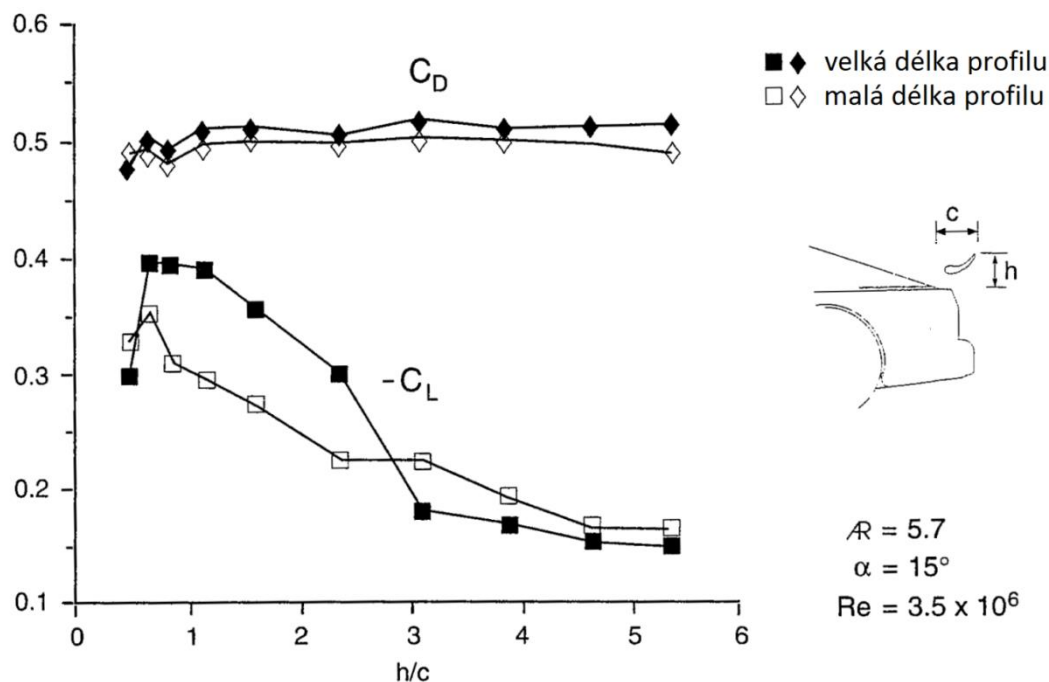
Vliv přítomnosti karosérie na aerodynamické parametry křídla je u automobilů značný, a nelze jej zanedbat. Karosérie ovlivňuje rychlost a směr proudu přicházejícího ke křídlu a tím mění úhel náběhu vzduchu na křídlo. [4]

Obr. 42 zobrazuje rozložení tlaku na povrchu křídla ve volném prostoru a v blízkosti karosérie. Tlak pod křídlem je srovnatelný. Ovšem nad křídlem dochází vlivem přítomnosti karosérie ke značnému poklesu tlaku, což snižuje hodnotu generovaného přítlaku. [4]



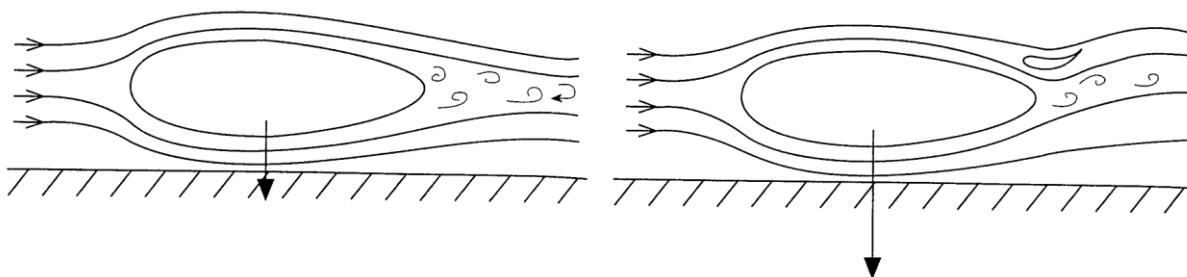
Obr. 42 Vliv přítomnosti karosérie na rozložení tlaku na křídle [4]

Vliv velikosti mezery mezi křídlem a karosérií h na součinitel odporu a součinitel vztlaku vozu je zobrazen na Obr. 43. Na obrázku jsou znázorněny závislosti pro dvě různé geometrie křídla. Křídlo s větší délkou profilu vykazuje progresivnější změny součinitele vztlaku v závislosti na vzdálenosti křídla od karosérie. Toto křídlo má délku 0,27 m. Menší křídlo má profil dlouhý pouze 0,21 m. Delší křídlo tedy dosahuje větších hodnot záporného vztlaku, je-li umístěno ve vhodné vzdálenosti od karosérie. Klesne-li poměr velikosti mezery a délky profilu křídla pod hodnotu přibližně 0,5, dochází ke značnému poklesu vztlaku, jelikož mezní vrstva, vznikající na zadním skle automobilu, brání průniku vzduchu mezi křídlo a karosérii, což má za následek značné zpomalení proudění pod křídlem. [4]



Obr. 43 Závislost aerodynamických koeficientů na vzdálenosti křídla od karosérie [4]

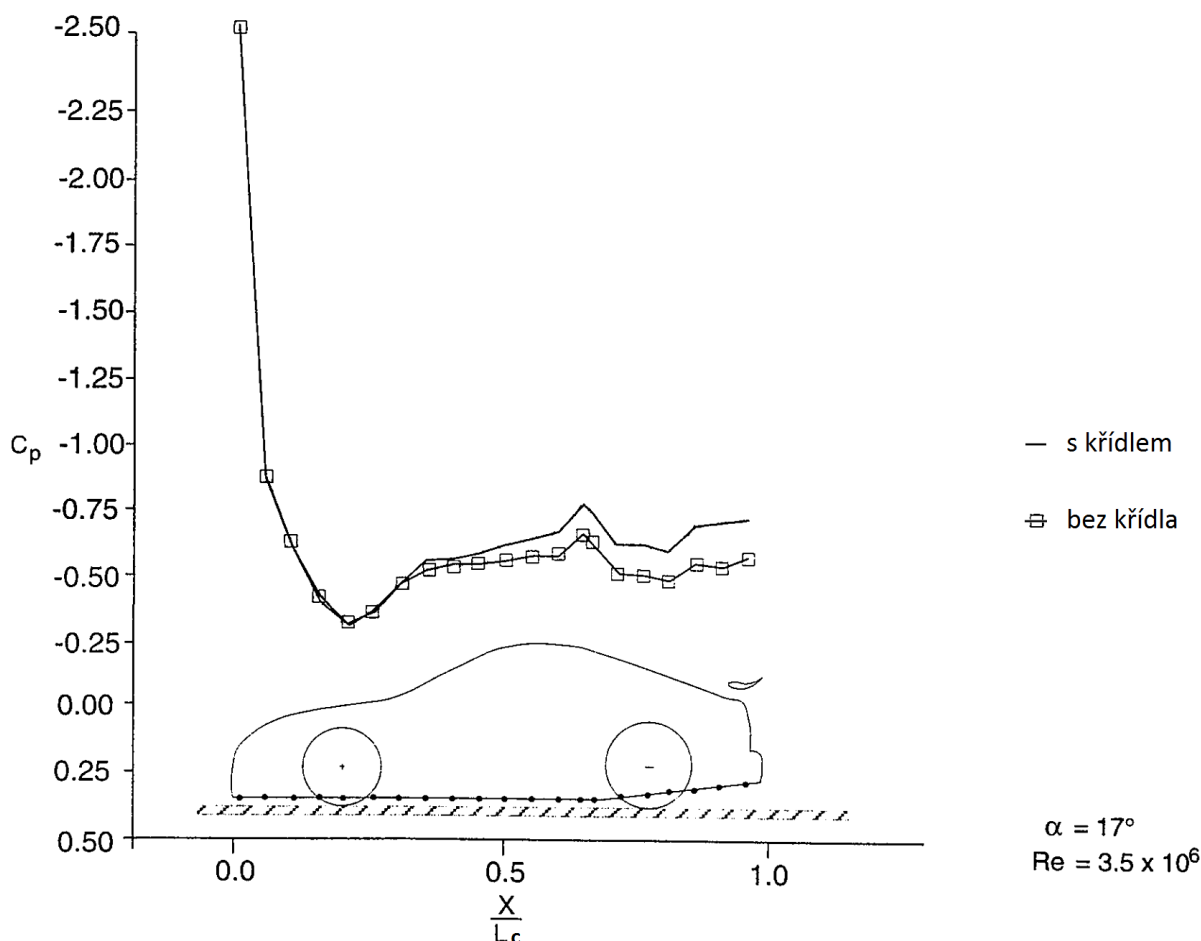
Křídlo má také značný vliv na zápornou hodnotu vztlaku vznikající pod automobilem. Křídlo redukuje odtrhávání vzduchu za vozidlem a tím i vznik vírů v této oblasti, což vede ke snížení tlaku za automobilem, viz Obr. 44. Snížení tlaku za vozidlem způsobí zvýšení rychlosti proudění vzduchu pod automobilem a tím i nárůst přítlačné síly. Tato síla působí navíc k přítlačné síle vyvolané samotným automobilovým křídlem. [4]



Obr. 44 Vliv křídla na vznik vírů za vozidlem [4]

Na Obr. 45 je zobrazen průběh součinitele tlaku působícího pod vozem bez křídla a s křídlem. Zde je dobře patrné, že při využití křídla se tlak pod zadní částí vozidla snížil. Jedná se o vůz

s hladkou spodní plochou. V případě osobních automobilů nelze dosáhnout takto výrazné změny. Délka vozu je značena jako L_c . [4]



Obr. 45 Průběh součinitele tlaku pod vozem [4]

Výše uvedené grafy podtrhují důležitost interakce křídla a karosérie. Někdy může být hodnota přitlaku vyvolaná pouze přítomností křídla větší, než hodnota, kterou generuje samotné křídlo. [4]

BOČNICE

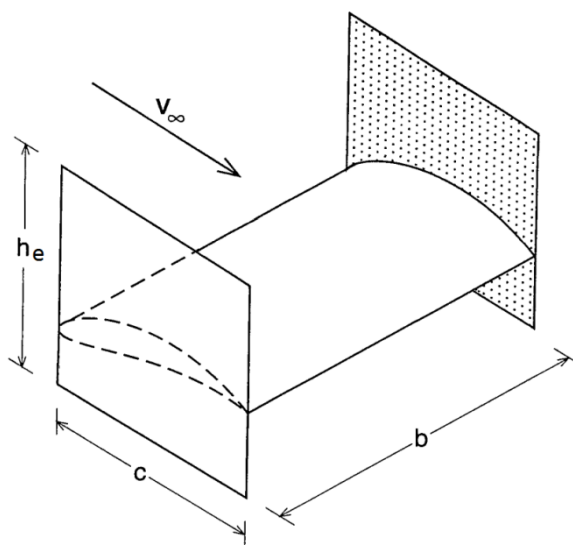
Jak bylo řečeno výše, boční hrany křídla generují víry, které snižují vztlak a zvyšují odpor křídla. Kvůli eliminaci tohoto jevu bývá automobilové křídlo na bočních hranách osazeno takzvanými bočnicemi neboli endplates, viz Obr. 46. Bočnice jsou ploché desky různých tvarů, které zvyšují hodnotu generovaného přitlaku křídla tím, že zabráňují vzniku vírů na bočních hranách křídla. [4]

Přítomnost bočnic také zvyšuje hodnotu aspect ratio [4]:

$$AR_e = AR \cdot \left(1 + 1,9 \cdot \frac{h_e}{b}\right), \quad (28)$$

kde h_e udává výšku bočnic.

Hodnoty součinitele vztlaku a odporu křídla lze spočítat pomocí stejných vztahů, jako v případě křídla bez bočnic, jen se využije přepočtené aspect ratio. [4]



Obr. 46 Křídlo osazené bočnicemi [4]

V automobilovém odvětví se často aplikuje pravidlo, že čím větší plocha bočnic, tím lépe. [4]

1.7 KANÁL CHLAZENÍ BRZD

Velikost síly, kterou dokážou brzdy vyvinout, je závislá na jejich teplotě. Při vysokých teplotách brzdového obložení dochází ke snižování brzdného účinku. Je tedy potřeba zajistit dostatečné chlazení brzd a to hlavně při intenzivním nebo dlouhodobém brzdění. U dnešních sériových automobilů je většinou dostatečný přísun vzduchu k brzdě zajištěn brzdovým kanálem, který vede vzduch z přední části automobilu do podběhu k brzdám. Kanály mohou tvořit součást podběhu vozidla nebo mohou být vloženy do předního nárazníku.

1.7.1 KANÁL V PODBĚHU

Umístění kanálu do podběhu je výhodnější z hlediska výrobních nákladů. To je hlavní důvod, proč se tyto částečně otevřené kanály často využívají u osobních automobilů nižších a středních tříd. Také nezabírají využitelný motorový prostor mezi nárazníkem a podběhem. U této konstrukce lze jen omezeně usměrňovat proud vzduchu do potřebných míst a výšková poloha kanálu je pevně dána. Kanál tedy není možno umístit do místa, které je z hlediska aerodynamických parametrů vozu optimální.

Tyto kanály mívají obdélníkový až lichoběžníkový průřez, který se směrem ke kolu rozšiřuje a zabíhá do podběhu, viz Obr. 47. K usměrnění proudu vzduchu k těmto kanálům se mohou využívat deflektory či clony před koly.



Obr. 47 Kanál v podběhu vozu Škoda Fabia a Volkswagen Jetta [39]

1.7.2 KANÁL V NÁRAZNÍKU

U kanálů umístěných v nárazníku je více možností, jak kanál tvarovat. Vstup i výstup kanálu je možno umístit do libovolného místa, což značně ovlivňuje rychlost vzduchu proudícího v kanále a jeho směr na výstupu. Nevýhodou je, že tento kanál zabírá místo v motorovém prostoru, kam se často umísťuje příslušenství automobilu, jako například nádržka odšťikovací kapaliny.

Tento typ kanálu se využívá u vozů vyšších tříd a sportovních modelů. Na Obr. 48 je zobrazen kanál u vozů značky Mini a Toyota. Průřez bývá obdélníkový či kruhový. Kanál by měl být co nejkratší, aby se minimalizovaly ztráty třením vzduchu o stěny kanálu a také aby se chladicí vzduch vlivem tření zbytečně nezahříval.



Obr. 48 Kanál pro vedení vzduchu k brzdě v nárazníku vozu Mini Cooper a Toyota GT86 [40][41]

Pro maximální efektivitu chlazení je důležité, aby vzduch vystupující z kanálu mířil přímo k brzdě. Proto se u závodních automobilů často využívají ohebné trubice, které vyúsťují až v těsné blízkosti kotouče brzdy a natáčejí se společně s kolem. Tento systém je zobrazen na Obr. 49.



Obr. 49 Chlazení brzd závodních vozů [42][43]

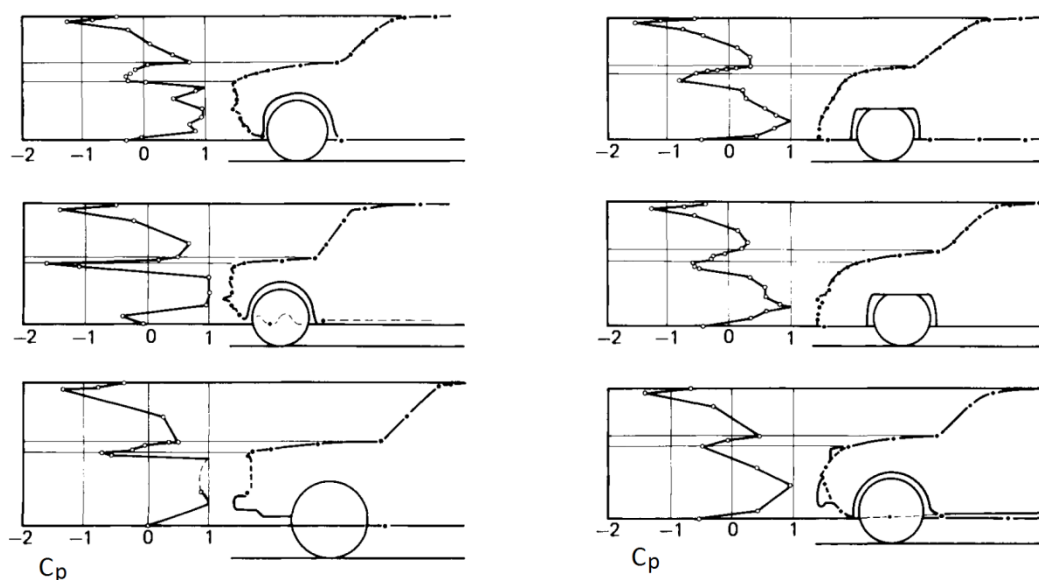
Brzdové kanály ovšem zvyšují množství vzduchu, které přichází do podběhu, což, jak bylo popsáno v kapitole 1.4.6, zhoršuje aerodynamické parametry automobilu. Z hlediska snížení aerodynamického odporu je tedy výhodné, aby do podběhu proudilo co nejméně vzduchu, ovšem z hlediska chlazení brzd je vzduchu potřeba co nejvíce.

Bude-li vzduch, vycházející z kanálu, nevhodně usměrněn, například na běhoun kola, bude pouze zvyšovat odpor a vztlak vozidla a účinek na chlazení brzd bude minimální. Je tedy potřeba vhodně volit polohu výstupního otvoru kanálu.

1.7.3 UMÍSTĚNÍ VSTUPU

Aby brzdovým kanálem proudil co největší objemový průtok vzduchu, musí se jeho vstup nacházet v místě, kde vzduch působí na karosérii největším tlakem. Této situace je možno docílit jen u kanálu vedeného v nárazníku.

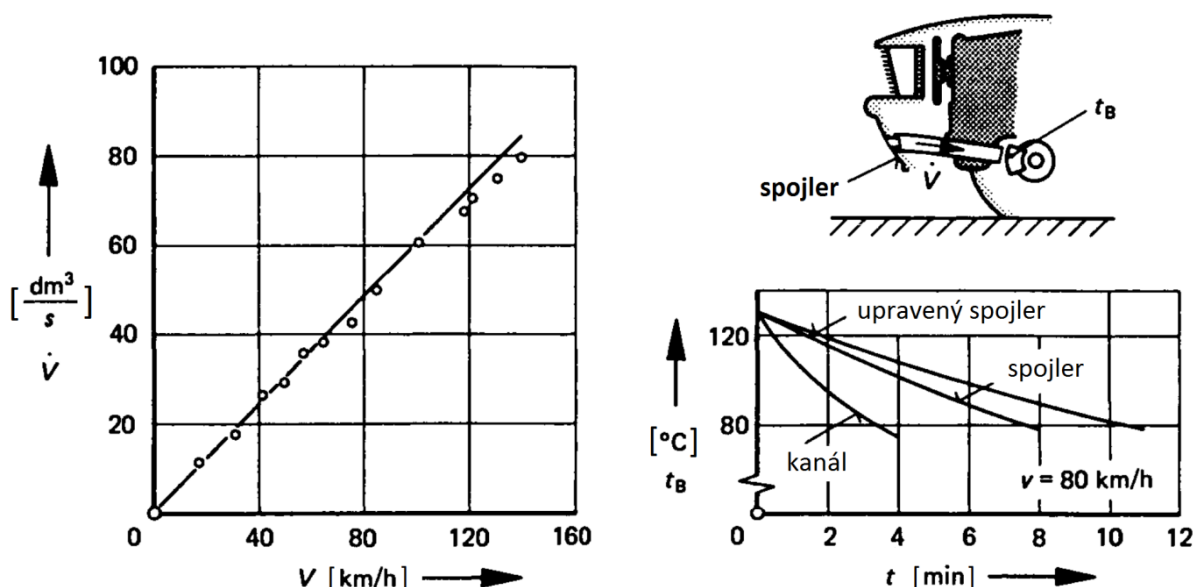
Na Obr. 50 je zobrazeno, jak se mění rozložení tlaku v přední části automobilu v závislosti na tvaru této části. Největší tlak je ve spodní polovině čela vozu. Do tohoto místa se umísťují brzdové kanály.



Obr. 50 Rozložení tlakového koeficientu na různě tvarovaných předních částech vozu [3]

1.7.4 ÚČINNOST KANÁLU

Na Obr. 51 jsou zobrazeny výsledky z měření účinnosti kanálu pro přívod chladícího vzduchu k brzdám.



Obr. 51 Měření účinnosti chlazení brzd [11][3]

Levý graf ukazuje závislost objemového průtoku vzduchu kanálem \dot{V} na rychlosti jízdy. Tato závislost je téměř lineární.

Pravý graf zobrazuje vliv chladícího vzduchu na teplotu brzd. Pokus by prováděn pro tři různé úpravy vozu. V prvním případě byl využit spojler před předním kolem, který usměrňoval část vzduchu proudícího pod vozidlo k brzdě. Při druhém měření se využil spojler speciálně upravený s ohledem na snížení aerodynamického odporu. Nakonec bylo provedeno měření s využitím kanálu pro přívod vzduchu. Kanál byl umístěn v nárazníku. Spojler byl pro toto měření odstraněn. [11][3]

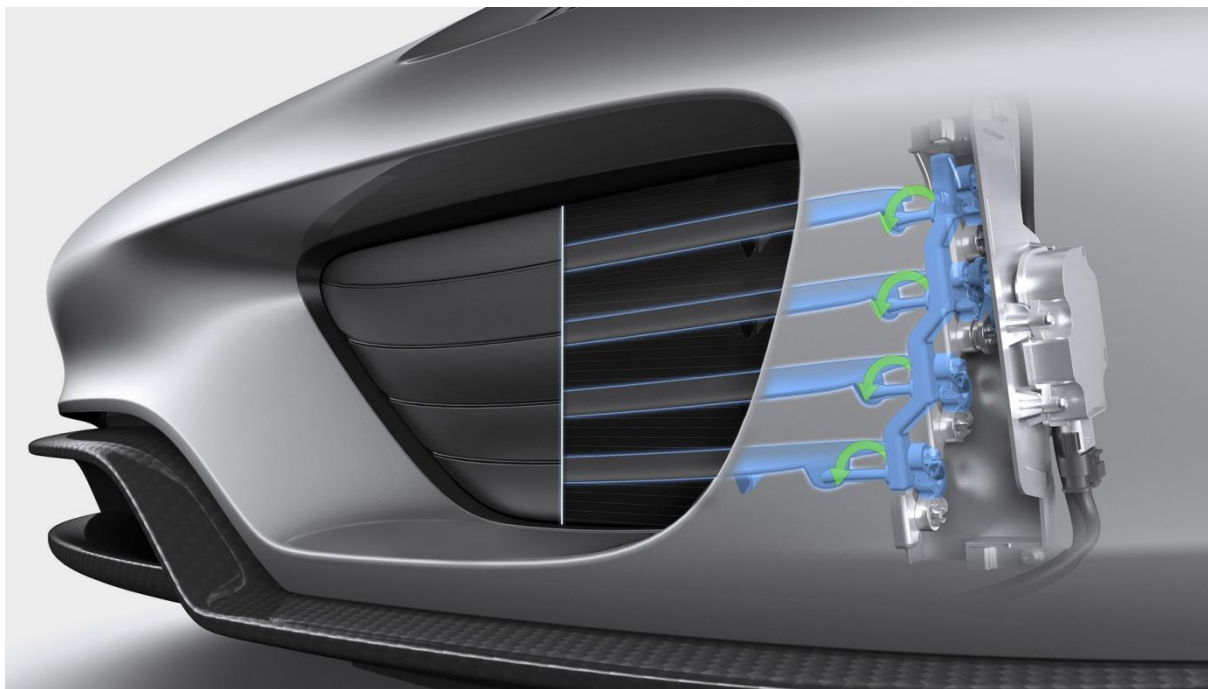
Při využití upraveného spojleru se sice snížil aerodynamický odpor vozidla, ale také klesla účinnost chlazení brzd ve srovnání s neupraveným spojlerem. Výsledky jasně ukazují, že nejefektivnější konstrukcí z hlediska chlazení brzdy byla konstrukce využívající kanál pro přívod vzduchu. Při využití kanálu klesl aerodynamický odpor o stejnou hodnotu, jako při využití speciálně upraveného aerodynamického spojleru. [11][3]

1.7.5 AKTIVNÍ BRZDOVÉ KANÁLY

V dnešní době již někteří automobiloví výrobci nabízejí modely vozů s aktivní aerodynamikou, která zahrnuje také uzavírání brzdových kanálů.

Mezi ně patří například Ferrari s modelem F12 Berlinetta. Tento vůz má brzdový kanál uzavřen klapkou. Řídicí jednotka pomocí senzorů neustále monitoruje teplotu brzd a v případě potřeby pomocí elektromotoru klapku otevře. Když je kanál uzavřený, dochází se snížení aerodynamického odporu vozidla.

Uzavírání chladicího kanálu využívá také výše popsaný systém Porsche Active Aerodynamic. Kanál je uzavírán pomocí několika natáčecích elementů, viz Obr. 52. Konstrukce tohoto systému je velmi podobná uzavírání přední masky vozu.



Obr. 52 Aktivní aerodynamický kanál přivádějící vzduchu k brzdám vozů Porsche [44]

1.8 URČENÍ HODNOT AERODYNAMICKÝCH PARAMETRŮ

Hodnoty aerodynamických parametrů automobilu je možno získat buď měřením, nebo počítačovou simulací. Měření se provádí v aerodynamických tunelech anebo při reálných silničních testech. Simulace jsou realizovány pomocí CFD (Computational Fluid Dynamics) softwarů. [1][3]

1.8.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

V aerodynamickém tunelu se měří jak reálná vozidla, tak modely ve zmenšeném měřítku. Testování skutečného vozidla je výhodnější z hlediska přesnosti výsledků, ovšem vyžaduje využití rozměrného tunelu, což je méně ekonomické. Při testování zmenšeného modelu lze využít menší tunel, ovšem rychlostní pole kolem modelu se odchyluje od pole, které se vytváří kolem reálného vozu. Pro minimální odchylku rychlostních polí musí být Reynoldsovo číslo vzduchu obtékajícího model stejné, jako v případě testování reálného automobilu. Jelikož je ovšem charakteristický rozměr obtékaného tělesa u modelu menší o hodnotu odpovídající měřítku, musí být o tutéž hodnotu zvýšena rychlost proudění vzduchu v tunelu. Při testování modelů v malém měřítku tak vznikají problémy s příliš vysokou rychlostí proudícího vzduchu. Zmenšený model také nezahrne všechny detaily karosérie. V Evropě je nejčastěji využíváno měřítko 1:4 či 1:5, v USA pak 3/8. [3]

TYPY TUNELŮ

Aerodynamické tunely se dělí na dva typy – tunely s otevřeným okruhem a tunely s uzavřeným okruhem. V tunelu s otevřeným okruhem je na vstupu neustále nasáván nový vzduch z okolního prostředí a vzduch, který prošel přes tunel, je vyfukován ven. V uzavřeném tunelu vzduchu cirkuluje a nedochází k jeho výměně. [3][4]

AERODYNAMICKÝ TUNEL S OTEVŘENÝM OKRUHEM

Otevřený tunel má tu výhodu, že vizualizační látky či zplodiny odcházejí z tunelu. Je také levnější na výstavbu a zabírá menší zástavbový prostor. Ovšem velkou nevýhodou je fakt, že proudění vzduchu v tunelu je ovlivněno okolními podmínkami. Je proto vhodné tento tunel umisťovat do vnitřních prostor. [3][4]

AERODYNAMICKÝ TUNEL S UZAVŘENÝM OKRUHEM

V uzavřeném tunelu se snadněji udržují požadované podmínky proudění. Tunel s uzavřeným okruhem má také nižší provozní náklady, protože cirkulující vzduch si uchovává velkou část získané pohybové energie. I u tohoto typu tunelu je ovšem potřeba vyměňovat část vzduchu, protože se v tunelu hromadí vizualizační látky a zplodiny. Vzduch je potřeba chladit kvůli teplotě, vznikajícímu při tření vzduchu o stěny a komponenty tunelu. Snižování teploty vzduchu se provádí buď výměnou části vzduchu, nebo prostřednictvím výměníků tepla. [3]

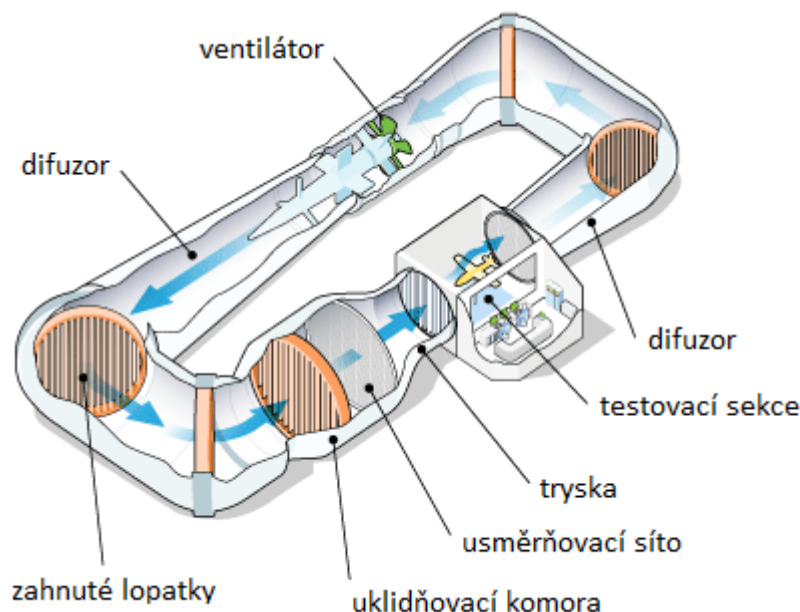
TESTOVACÍ PROSTOR

Pro testování reálných automobilů se nejčastěji využívají tunely s uzavřeným okruhem a otevřeným testovacím prostorem. Otevřený testovací prostor nejvíce napodobuje reálné podmínky proudění vzduchu kolem vozidla, protože eliminuje takzvanou blokaci (blockage). K blokaci dochází, když proudící vzduch dorazí k testovanému vozidlu, protože se náhle zmenší plocha, kterou může vzduch proudit. Velikost blokace je udávána pomocí tzv. blockage ratio. Často se využívá i částečně uzavřený testovací prostor s drážkovanou stěnou, který také značně eliminuje blokaci, ale přitom nevyžaduje tak velkou zástavbovou plochu. Z ekonomického hlediska je výhodnější i jeho provoz. [3]

ČÁSTI TUNELU

Hlavní části uzavřeného aerodynamického tunelu jsou zobrazeny na Obr. 53. Tunel je vybaven dvěma difuzory, které mají za úkol snížit rychlost proudícího vzduchu v těch částech tunelu, kde neprobíhá testování a tím snížit ztráty při proudění. Prohnuté lopatky usměrňují proudící vzduch při změně jeho směru, čímž napomáhají snižovat energetické ztráty. Ventilátor dodává vzduchu potřebnou energii. Regulace rychlosti proudění probíhá pomocí natáčení lopatek ventilátoru nebo pomocí regulace otáček samotného ventilátoru. Za ventilátorem bývají umístěny rovnací lopatky, které upravují vznikající vířivé proudění generované ventilátorem na rovnoměrný proud vzduchu. Na vstupu do testovacího prostoru je umístěna tryska, která urychluje pomalu proudící vzduch v tunelu. Těsně před vstupem do trysky prochází vzduch přes uklidňovací komoru, která je tvořena rovnacími lopatkami a soustavou usměrňovacích sít a voštin, které upravují případné turbulentní proudění na laminární. Dále bývá tunel vybaven výměníky vzduchu a případně i tepelnými výměníky. [3][4]

Maximální rychlost vzduchu, které je možno v tunelu dosáhnout, přesahuje hodnotu 250 kilometrů za hodinu.



Obr. 53 Schéma aerodynamického tunelu s uzavřeným okruhem

ELIMINACE MEZNÍ VRSTVY

Při testování vozu v aerodynamickém tunelu nastává situace, kdy je stojící vůz obtékán proudícím vzduchem. Na rozdíl od reálné jízdy vozidla se při těchto testech vytváří mezi podlahou tunelu a proudícím vzduchem mezní vrstva, která značně ovlivňuje výsledky. Částečně lze tento problém odstranit odsáváním vzduchu pod vozidlem nebo přiváděním přídavného vzduchu k podlaze před vozidlo. Problém mezní vrstvy eliminuje umístění vozu nad úroveň podlahy, nebo pohyblivý pás pod vozidlem. V případě testování modelu ve zmenšeném měřítku lze model zrcadlit dle roviny vozovky a tím zabránit vzniku mezní vrstvy. U metod eliminujících mezní vrstvu je problém s polohovou fixací reálného automobilu či většího modelu. [3][4]

V moderních tunelech se pro eliminaci mezní vrstvy využívá pohyblivý pás mezi koly vozidla v kombinaci s odsáváním mezní vrstvy a přívodem vzduchu okolo celého vozidla.

DRUHY TESTOVÁNÍ

V aerodynamických tunelech se provádí čtyři základní druhy testování. Prvním z nich je měření aerodynamických parametrů vozu. Měří se aerodynamické síly a momenty působící na vozidlo a rozložení tlaku kolem karosérie. V dalším typu měření se zkoumá obtékání vzduchu okolo karosérie jako celku a kolem jednotlivých detailů. Třetí druh testů se zabývá prouděním vzduchu v motorovém prostoru. Jako poslední zbývá měření proudění vzduchu v prostoru pro cestující, tedy testování topení, ventilace a klimatizace. [3]

1.8.2 MĚŘENÍ AERODYNAMICKÝCH SIL A MOMENTŮ V TUNELU

Níže popsany průběh testování se využívá v moderních aerodynamických tunelech, jakým je například tunel FKFS ve Stuttgartu.

PRŮBĚH MĚŘENÍ

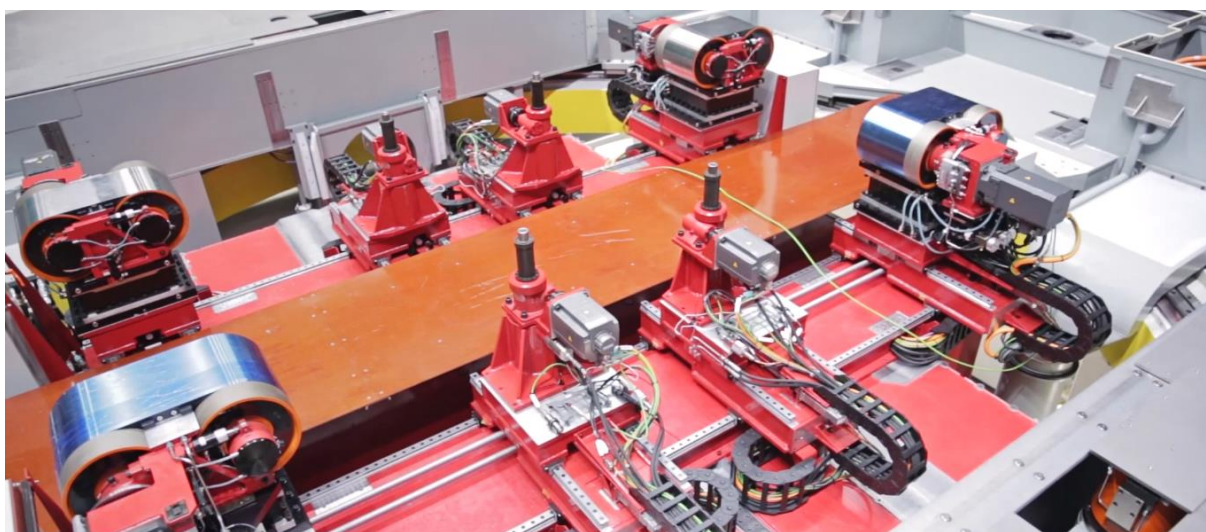
Poloha vozu je zafixována pomocí upevňovacích tyčí. Ty bývají většinou čtyři a jsou připevněny k prahům testovaného vozidla, viz Obr. 54.



Obr. 54 Testování aerodynamických parametrů automobilu v tunelu FKFS [47]

Aerodynamické síly a momenty se měří pomocí upevňovacích tyčí. Tyče jsou vybaveny šestiosým tenzometrem a dokáží měřit zatížení ve všech třech osách a stejně tak i silové momenty působící kolem těchto os. K měření aerodynamických vztlakových sil na jednotlivých kolech se využívají šesti-komponentní váhy. Váhy bývají nejčastěji umístěny pod podlahou testovacího prostoru. Tento typ vah téměř nezkrsluje výsledky měření. [3]

Tyče i váhy mohou měnit svou polohu a umožnit tak testování různých automobilů. Pohled na celé měřicí zařízení umístěné v podlaze tunelu je zobrazen na Obr. 55. Zde jsou dobře patrné čtyři měřicí tyče a také čtyři pohyblivé pásy, na kterých jsou při testování umístěna kola vozidla. Pod těmito pásy jsou umístěny právě šesti-komponentní váhy. Při měření automobilu jsou kola roztáčena pomocí pohybujících se pásů. Dále je zde patrný pás mezi koly vozidla simulující ubíhající vozovku. Měření aerodynamických parametrů je tak přesnější, jelikož se podobá reálné jízdní situaci.



Obr. 55 Měřicí zařízení tunelu FKFS [46]

MĚŘENÍ TLAKU

Většinou se měří jak hodnota tlaku statického, tak i dynamického. Z hodnot dynamického tlaku je možno dopočítat rychlost proudění vzduchu okolo vozidla, zatímco statický tlak se využívá pro detekci odlišných tlakových zón na vozidle. Tlaky se často měří pomocí Pitotových trubic různých konstrukcí. Pro měření statického tlaku se využívají také speciální senzory, které se připevňují na karosérii. Senzor kruhového tvaru má asi milimetrovou tloušťku. Uprostřed senzoru se nachází otvor kolmý ke karosérii o průměru 0,8 milimetrů, na který je napojen manometr. Pro minimální ovlivnění proudění vzduchu kolem povrchu vozu je možno využít podobný senzor, který je umístěn uvnitř karosérie. Nevýhoda tohoto senzoru spočívá v tom, že je nutno vytvořit do povrchu karosérie otvor. [3]

RYCHLOST PROUDĚNÍ VZDUCHU

Rychlost proudění vzduchu v_{AT} okolo karosérie vozu je možno vypočíst dle následujícího vzorce [3]:

$$v_{AT} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p_{dyn}}, \quad (29)$$

kde Δp_{dyn} představuje dynamický tlak na povrchu karosérie.

Dynamický tlak pro výpočet rychlosti může být naměřen pomocí Pitotovy trubice, ovšem při nízkých rychlostech proudění vzduchu ($3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a méně) je měření již nepřesné. Pro měření rychlosti se v těchto případech využívají malé lopatkové anemometry nebo termoanemometry. Termoanemometr pracuje na principu, že se vlivem rozdílné rychlosti proudění vzduchu okolo elektricky žhaveného drátu mění teplota a spolu s ní i elektrický odpor drátu. Počet drátů v měřicím senzoru odpovídá počtu měřených os. [3]

SMĚR PROUDĚNÍ VZDUCHU

Pitotova trubice a anemometry či termoanemometry měří s velkou přesností pouze za předpokladu, že jsou vhodně natočeny ke směru proudění vzduchu. Proto je vhodné měřit i směr proudění. K tomuto účelu se používají dva typy měřicích přístrojů. První typ je vybaven vícero otvory, které jsou umístěny po dvojicích v několika rovinách. Směr proudění je vypočítáván na základě rozdílu tlaků v jednotlivých otvorech. Druhým měřicím zařízením je sonda měřící rychlost ve všech třech osách pomocí tří žhavených drátů. [3]

Dále se měří teplota vzduchu, která je důležitá hlavně u testů chlazení motoru či simulací funkce vytápění a klimatizace. [3]

VIZUALIZACE

Vizualizace je vhodný nástroj k vyšetřování a porozumění proudění vzduchu kolem vozidla. Nejjednodušší metodou vizualizace je připevnění proužků textilie na karosérii. Tato metoda může pomoci s nalezením například místa odtržení proudu vzduchu. Při využití tenké vrstvy oleje či jílu, kterým je natřen obtékaný povrch, je možno dosáhnout větších detailů, na druhou stranu je zase obtížnější identifikovat místo odtržení. Nejčastěji se pro vizualizaci využívá kouř, který dává celkový pohled na průběh proudění vzduchu kolem automobilu. Vizualizace pomocí kouře je zobrazena na Obr. 56. [3]



Obr. 56 Vizualizace proudění pomocí kouře

MĚŘENÍ OCHLAZOVÁNÍ BRZD

Při zkoumání účinnosti chlazení brzd se často využívá vizualizační kouř, který zviditelňuje proudění chladicího vzduchu. Rychlost proudění v oblastech okolo samotné brzdy se měří pomocí termoanemometru. [3]

Provádí se také test výkonu brzd. Pomocí dynamometru se brzdy zahřívají a teplota jednotlivých součástí brzdové soustavy se monitoruje. Může se měřit teplota chladicí kapaliny či teplota samotného brzdového kotouče nebo třmene. Po ukončení brzdění se zaznamenává pokles teploty brzd v závislosti na čase. [3]

1.8.3 SILNIČNÍ TEST

Aerodynamická měření s reálným vozem se dají provádět také na silnici. Zde ovšem hraje značnou roli vliv počasí. Ideálně je potřeba zkoušky provádět při úplném bezvětří. Často využívaným silničním testem je dojezdová zkouška. [3]

Při této zkoušce se automobil rozjede na předem stanovenou rychlost, kterou bývá často hodnota 130 kilometrů za hodinu. Poté se zařadí neutrál a vozidlo volně dojíždí až do rychlosti okolo 20 kilometrů v hodině. Po celou dobu je zaznamenávána rychlost vozu. Zpomalení je způsobeno aerodynamickým a mechanickým odporem. Součet těchto odporů v každém okamžiku je možno určit z hmotnosti vozu a z naměřených hodnot rychlosti. Pro získání pouze aerodynamického odporu, ze kterého je možno dopočítat koeficient odporu, je potřeba získat hodnotu odporu mechanického. Celkový mechanický odpor vozu je možno určit jako součet odporu valení pneumatik a mechanického odporu hnací soustavy, který lze naměřit v laboratoři.

Po naměření jednotlivých veličin je potřeba provést jejich korekce dle aktuální teploty a hustoty vzduchu. Pokud je rychlost větru větší, než 2 metry za sekundu, je potřeba provést i korekci větru.

1.8.4 CFD SIMULACE

Výhodou využití počítačových simulací je značná redukce nákladů a také času potřebného pro získání výsledků. Pro přesné výsledky simulací je potřeba přesně stanovit okrajové podmínky, což je v mnoha případech značně obtížné. V praxi se tedy při experimentu naměří potřebné parametry, jejichž hodnoty se porovnají s hodnotami určenými při simulaci a se získanými odchylkami se nadále pracuje při dalších výpočtech. [3]

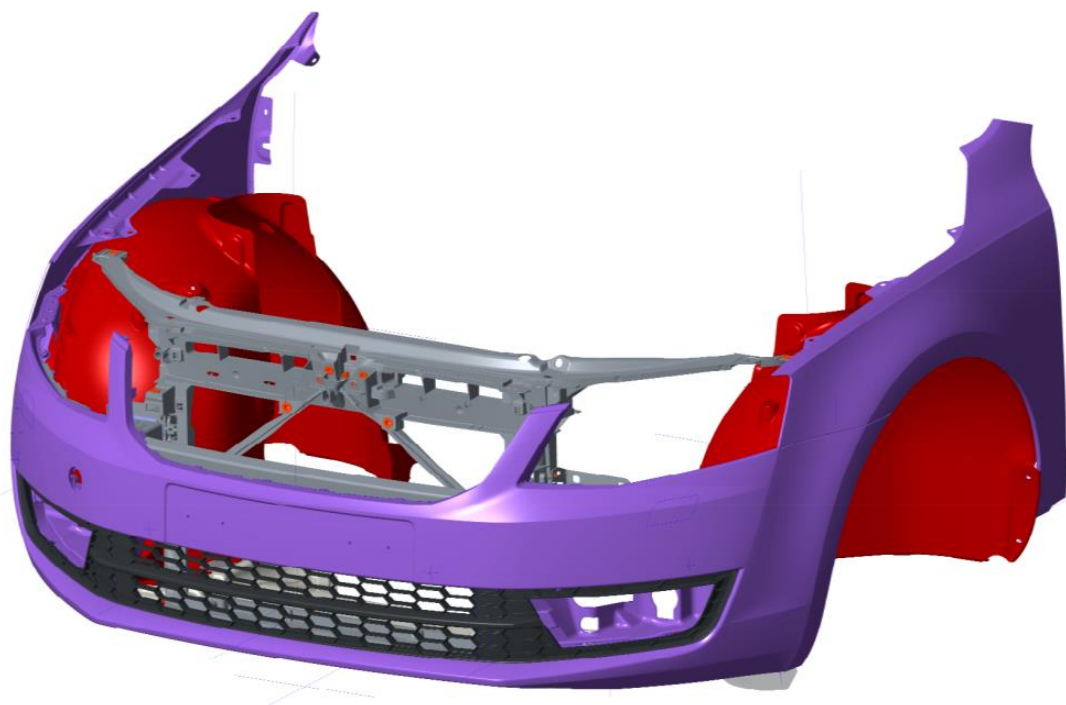
Pro CFD simulace se nejčastěji užívají softwary STAR-CCM+, ANSYS Fluent, PowerFLOW či OpenFOAM.

2 NÁVRH AKTIVNÍHO BRZDOVÉHO KANÁLU

První část této diplomové práce je věnována návrhu, výrobě a testování prototypu aktivně uzavíratelného kanálu, který přivádí chladicí vzduch k brzdám přední nápravy.

Kanál prochází od nárazníku až do podběhu automobilu a je uzavírán pomocí mechanické klapky, která je ovládána servomotorem. Servomotor je řízen mikroprocesorem. Mikroprocesor vyhodnocuje údaje o přetlaku v brzdovém systému a rychlosti automobilu, které jsou odečítány ze sběrnice CAN.

Prototyp tohoto aktivního aerodynamického prvku je vytvořen pro vůz Škoda Octavia třetí generace. Model kanálu byl navrhnut a vytvořen za pomoci sestavy CAD modelů přední části vozidla, které byly poskytnuty společností Škoda Auto a.s. Sestava dodaných CAD modelů je zobrazena na Obr. 57.



Obr. 57 Sestava dodaných CAD modelů přední části vozu Octavia

2.1 SÉRIOVÝ KANÁL VERSUS PROTOTYPOVÝ KANÁL

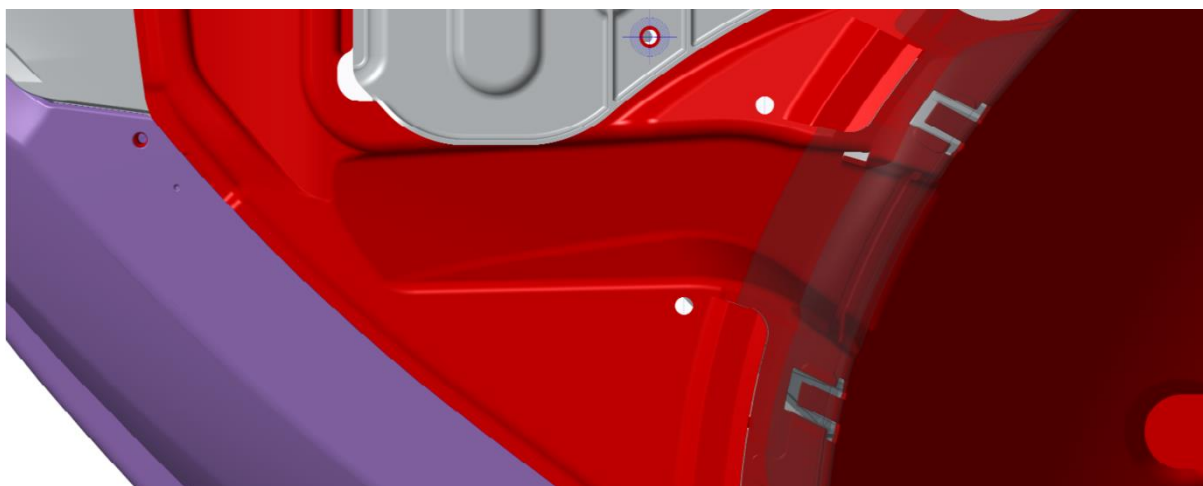
Sériová verze Octavie využívá pro chlazení brzd částečně otevřený kanál, který je součástí podběhu.

Na Obr. 58 je vyznačeno umístění těchto sériových chladicích kanálů na sestavě CAD modelů přední části vozidla.

Detail sériového kanálu při pohledu zespoda na automobil je zobrazen na Obr. 59. Kanál zvětšuje svoji výšku ve směru proudění vzduchu kvůli snaze přivádět chladicí vzduch přímo k brzdě. Z tohoto důvodu je také kanál ze začátku přímý a ke konci se stáčí.



Obr. 58 Umístění sériových chladících kanálů na vozidle



Obr. 59 Detail sériového kanálu v podběhu

Nahrazení tohoto jednoduchého kanálu aktivním kanálem vedeným v nárazníku přispívá ke snížení celkového aerodynamického odporu vozidla v případě, že brzdy nebudou využívány a klapka bude uzavírat vstup do kanálu. Aerodynamický odpor vozu je snížen především o ztráty vznikající interakcí přiváděného chladícího vzduchu se vzduchem proudícím v podběhu a nepatrně také o ztráty vznikající prouděním vzduchu v kanálu.

V případě nutnosti chlazení brzd se klapka otevře. K brzdám bude proudit větší hmotnostní tok vzduchu ve srovnání se sériovým kanálem. Brzdy tak budou lépe chlazené, což přispěje ke zvýšení efektivity brzdění. Aerodynamický odpor automobilu při otevřeném kanálu ve srovnání se sériovým řešením mírně naroste, protože do podběhu bude proudit více vzduchu.

Přínosem navrženého aktivního kanálu je tedy snížení aerodynamických ztrát vozidla v případě, kdy nejsou využívány brzdy a zvýšení efektivity chlazení brzd při samotném brzdění.

2.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Před samotným konstrukčním návrhem kanálu bylo nutno nejdříve prostudovat dodanou sestavu CAD modelů, jelikož tvar a umístění kanálu byly limitovány omezeným prostorem v přední části vozidla.

2.2.1 VOLBA KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

Prvním krokem při konstrukčním návrhu kanálu bylo zvolit vhodný mechanismus jeho uzavírání. Volba mechanismu závisela na faktu, že je vhodné klapku umístit co nejbližší vstupu vzduchu do kanálu, aby nevznikal velký aerodynamický odpor při vnikání vzduchu do zaslepeného kanálu.

MECHANISMUS UZAVÍRÁNÍ KANÁLU

Ideálně by měla být klapka zkonstruována tak, aby při uzavření kanálu hladce navazovala na okolní povrch automobilu. Mohla by se využít jednodílná klapka, která by při uzavření kopírovala povrch nárazníku, ovšem toto řešení by zahrnovalo úpravy nárazníku a všech částí automobilu v okolí vstupu do kanálu a samotná konstrukce by byla značně komplikovaná. Také by mohly být využity otočné segmenty, které se dnes využívají například pro uzavírání přední masky. Přítomnost segmentů ovšem zvyšuje aerodynamický součinitel odporu a i když by toto řešení bylo konstrukčně jednodušší, než klapka z jednoho kusu, je zvláště mechanismus ovládání segmentů stále značně konstrukčně náročný. Proto bylo zvoleno řešení, kdy sice klapka nenavazuje jednodílně na povrch nárazníku, ale je umístěna co nejbližší vstupu vzduchu do kanálu.

Do úvahy připadaly tři možnosti pohybu uzavírací klapky. Klapka mohla být výklopná, otočná a výsuvná.

VÝKLOPNÁ Klapka

Výklopná klapka by byla při otevřeném kanálu uložena paralelně se směrem proudění vzduchu a v případě potřeby by se vyklopila o 90 stupňů, čímž by kanál uzavřela. Tento typ klapky by bylo z hlediska minimálního aerodynamického odporu vhodné zkonstruovat jako součást stěny kanálu. Takovéto řešení by ovšem nebylo realizovatelné, jelikož kanál má zakulacené hrany a také se na vstupu stáčí a jeho stěny tedy nejsou rovinné. Do úvahy tak připadala výklopná klapka, která by nebyla součástí stěny kanálu. Tato klapka by ovšem značně narušovala proudění vzduchu v kanálu a tím by zvyšovala aerodynamický odpor a snižovala rychlost proudění, což by mělo za následek horšení účinnosti chlazení brzd. Výklopná klapka je také nevhodná z hlediska utěsnění kanálu. Kolem klapky by vždy vznikala mezera, kterou by část proudícího vzduchu pronikla dále do kanálu. Aby mohla být klapka umístěna co nejbližší vstupu do kanálu, musela by se vyklápět proti působení proudění vzduchu. Servomotor by proto musel překonávat značnou sílu.

OTOČNÁ Klapka

Otočná klapka by pracovala podobně jako například škrtková klapka v sání motoru. Při uzavření by se natočila kolmo ke směru proudění a zabránila by tak vzduchu v dalším pohybu. Otočná klapka je konstrukčně jednoduchá a celý mechanismus by zabíral malý zástavbový prostor. Přítomnost klapky v kanále sice generuje aerodynamický odpor, ovšem jeho hodnota by byla menší, než u klapky výklopné. Nevýhodou je, že stejně jako v předchozím případě by klapka musela být vyrobena s velkou přesností, aby dobře utěsnila kanál. Výroba klapky byla

plánována na 3D tiskárně. Výrobní přesnost této metody se pohybuje v řádu desetin milimetru. Proto by se mohlo stát, že klapka kanál řádně neutěsňuje. Také řízení natočení klapky by muselo být značně přesné a vůle v systému minimální, aby bylo dosaženo maximálního utěsnění. Netěsnosti by zvyšovaly celkový aerodynamický odpor soustavy. Také by bylo potřeba vyvinout velkou ovládací sílu. Další komplikací je umístění klapky na vstupu do kanálu. Pomocí otočné klapky je možno uzavřít kanál téměř na povrchu nárazníku, ovšem v otevřeném stavu by část klapky vystupovala ven z povrchu nárazníku, což by mohlo mít za následek mechanické poškození klapky.

VÝSUVNÁ KLAPKA

Jako nejvýhodnější řešení se ukázalo využití výsuvné klapky, a proto bylo také vybráno. Klapka se zasouvá a vysouvá z prostoru kanálu a tím uzavírá či otevírá kanál. Výhodou tohoto řešení je efektivnost uzavření kanálu. Nevznikají zde mezery, kterými by mohl vzduch pronikat, čímž se snižuje koeficient odporu. Klapku lze umístit v blízkosti vstupu do kanálu. U této konstrukce je nutno vyvinout menší ovládací sílu pro uzavření a otevření kanálu. Nevýhodou představuje velký zástavbový prostor tohoto řešení. Díky drážkám ve stěnách kanálu, ve kterých se klapka pohybuje, je generován vyšší aerodynamický odpor vznikající interakcí proudícího vzduchu se stěnami kanálu. Ovšem v samotném kanálu není umístěno žádné těleso, které by generovalo přídavný aerodynamický odpor.

POLOHA KANÁLU V AUTOMOBILU

Dalším krokem při návrhu kanálu bylo zvolit vhodné místo na předním nárazníku pro umístění vstupu. Ideálně by se měl vstup do kanálu nalézat v oblasti, ve které působí proudící vzduch na povrch karosérie největším tlakem, tzn. co nejbližší stagnačnímu bodu. Vysoký tlak vzduchu umožní velký hmotnostní průtok kanálem, což zvýší efektivitu chlazení brzd.

Kanál by měl být co nejkratší kvůli minimalizaci tření vzduchu o stěny. Tření jednak zvyšuje aerodynamický odpor a také ohřívá chladicí vzduch. Proto je třeba vhodně zvolit polohu vstupu vzhledem k poloze výstupu kanálu.

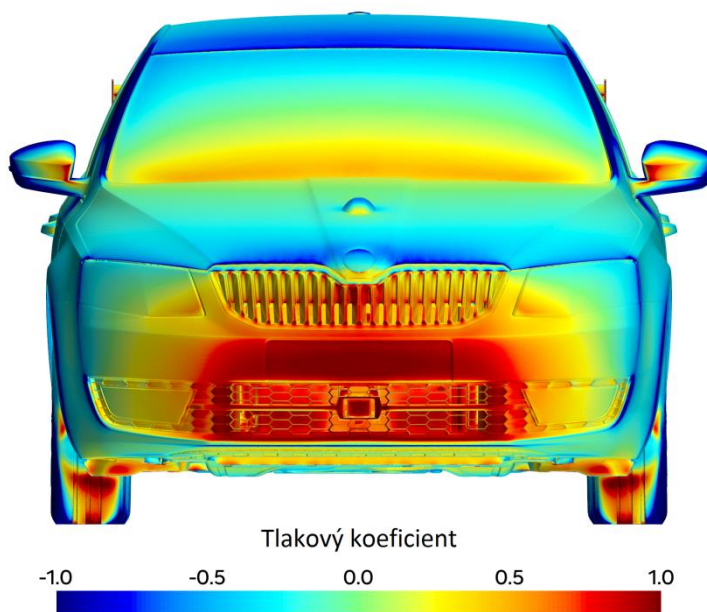
Poloha výstupu je dána polohou kola a brzdy v podběhu a také tvarem samotného kanálu. Kanál svým tvarem ovlivňuje směr proudění vzduchu na výstupu. Proud by měl proudit přímo k brzdě. Pokud bude vzduch, i když jen částečně, proudit na běhoun pneumatiky, nebude tato část vzduchu přispívat ke chlazení brzdy a navíc bude generovat přídavní aerodynamický odpor kola.

Při konstrukci kanálu se tedy musely vzít do úvahy všechny předchozí poznatky a jeho vstup, výstup a tvar samotného kanálu navrhnout jako celek.

2.2.2 SAMOTNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

VSTUP

Při konstrukčním návrhu bylo tedy snahou umístit vstup do místa, které by bylo výhodné z hlediska rozložení tlaku a zároveň nenarušit tvar a vzhled vnější části předního nárazníku. Při volbě polohy vstupu bylo využito znalostí o rozložení aerodynamického tlaku na povrchu přední části Octavie. Toto rozložení tlaku, získané z CFD výpočtu automobilu s osazeným zadním aktivním křídlem, je zobrazeno na Obr. 60.



Obr. 60 Rozložení tlaku v přední části vozu Octavia

Z hlediska rozložení tlaku je nejhodnější umístit vstup do oblasti mezi mlhovým světlometem a otvorem pro přívod vzduchu ke chladiči. Díky požadavku minimální délky kanálu se jeví jako nejvhodnější místo pro umístění vstupu oblast mlhového světlometu.

V první fázi konstrukce se počítalo s využitím několika zaslepených ok v síti spodní masky vozu. Tato konstrukce by nenarušovala vzhled vozu a vyžadovala by pouze drobný zásah do spodní masky. Ovšem při detailnějším průzkumu dodaných CAD modelů přední části vozu se ukázalo, že aby mohl být vstup umístěn v této oblasti bez zásadnějších konstrukčních úprav, musela by být jeho plocha značně malá. Zásadnější konstrukční úpravou se rozumí zásah do nosných konstrukcí či úprava tvaru vnějších částí nárazníků a masky. Průtok vzduchu kanálem by byl při této konstrukci nedostatečný a chlazení méně účinné.

Bylo tedy zvoleno jiné řešení. Jelikož se jedná o prototyp aktivního kanálu, bylo na místě vyjmout přední mlhový světlomet a do vzniklého prostoru umístit vstup do kanálu. Plocha vstupu do kanálu tak již byla dostatečná. Otvor kolem nevyužitého prostoru po vyjmuté mlhovce je uzavřen pomocí navržené krytky.

Snahou bylo, aby měl kanál po celé své délce konstantní průřez a nedocházelo tak ke změnám rychlosti proudění při průchodu vzduchu kanálem. Velikost plochy průřezu byla zvolena s ohledem na velikost výstupního průřezu původního kanálu a na základě provedeného průzkumu chladicích kanálů u sériových a sportovních automobilů. Plocha průřezu prototypového kanálu se pohybuje okolo hodnoty 66 cm^2 a je větší, než plocha průřezu kanálu sériového. Velikost plochy není po celé délce kanálu konstantní, jelikož má vstupní a výstupní otvor jiný tvar. Při návrhu bylo snahou zachovat průřez konstantní a proto je odchylka velikosti plochy vstupu a výstupu malá. Výstup z kanálu má tvar čtverce se zakulacenými hranami. Vstupní otvor je tvaru kosodélníku, kopírující zkosení mlhového světlometu. Přesný tvar a umístění vstupu do kanálu je zobrazeno na Obr. 61. Žlutou barvou je označena krytka mlhovky a bílou barvou samotná klapka kanálu. I když se jedná pouze o prototyp kanálu, bylo snahou, aby jeho přítomnost nenarušovala celkový charakter vozu. Při využití obdélníkového či kruhového tvaru vstupu by bylo snadnější dosáhnout konstantního

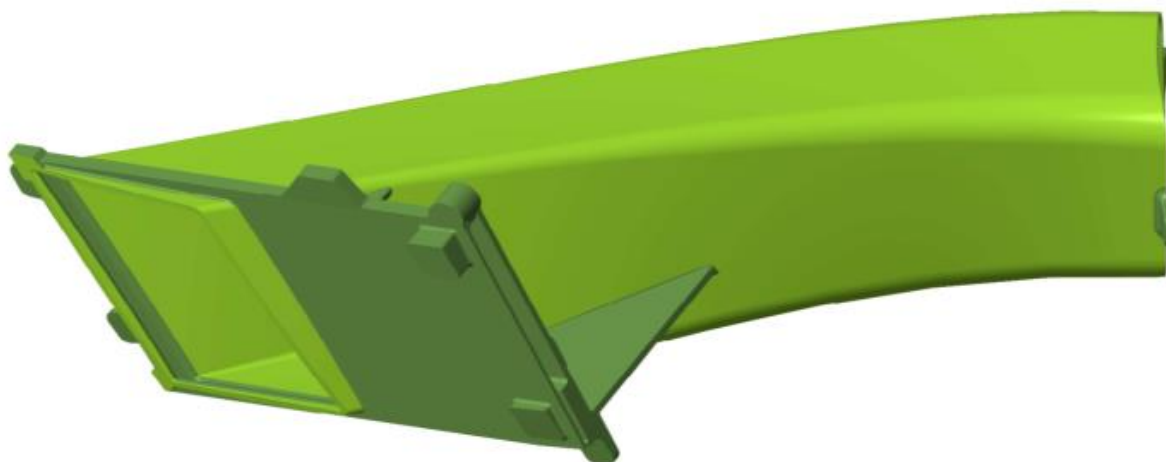
průřezu kanálu a i samotná konstrukce by byla jednodušší, ovšem takovýto tvar kanálu by nezapadal do celkového designu vozu.



Obr. 61 Vstup do kanálu s uzavřenou klapkou

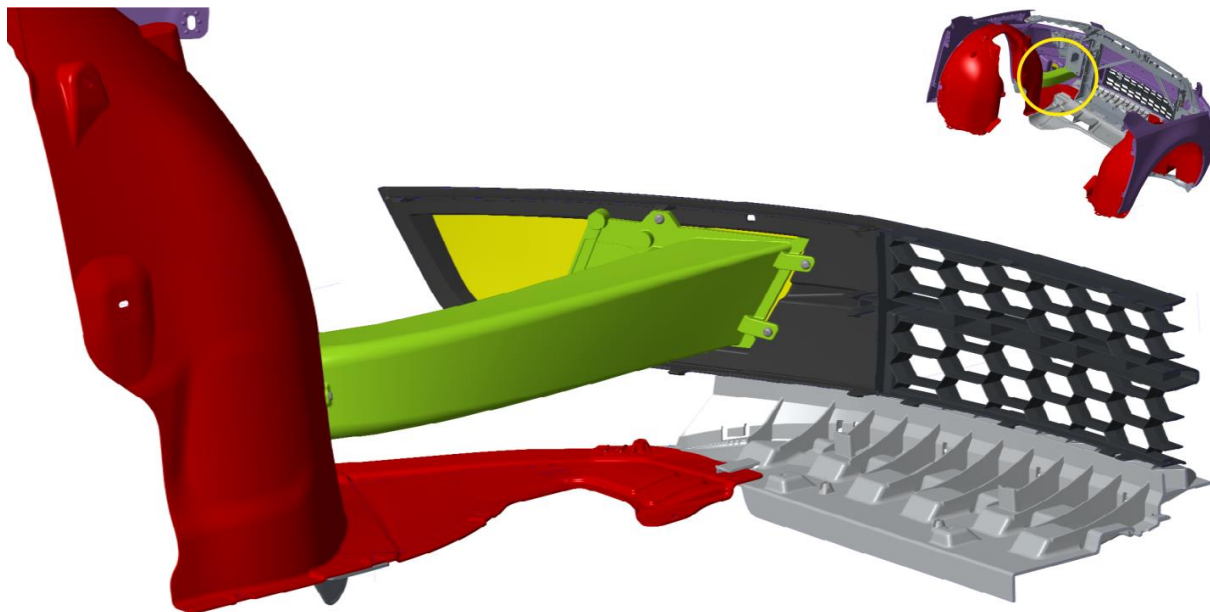
KANÁL

Při tvorbě modelu kanálu byl využit software Creo 2.0. Samotný kanál je vytvořen jako skořepina o tloušťce stěny 2 mm, viz Obr. 62. Světlým odstínem zelené barvy je označen samotný kanál a tmavým odstínem je v přední části kanálu vyznačena struktura sloužící pro uložení klapky. Jedná se v podstatě o desku s dutinou, ve které se pohybuje klapka. Klapka v uzavřené poloze zapadá do drážky v boční stěně kanálu. Pomocí tří šroubů je na desku upevněn servomotor. Pro větší tuhost konstrukce je deska spojena s kanálem pomocí žeber. Největší žebro je opatřeno otvorem, který umožňuje připojení konektoru do servomotoru. Na desce jsou vymodelovány čtyři výstupky sloužící k upevnění kanálu na automobil. Zbylé výstupky slouží k montáži krytky, která překrývá prostor po vyjmutém mlhovém světlometu.



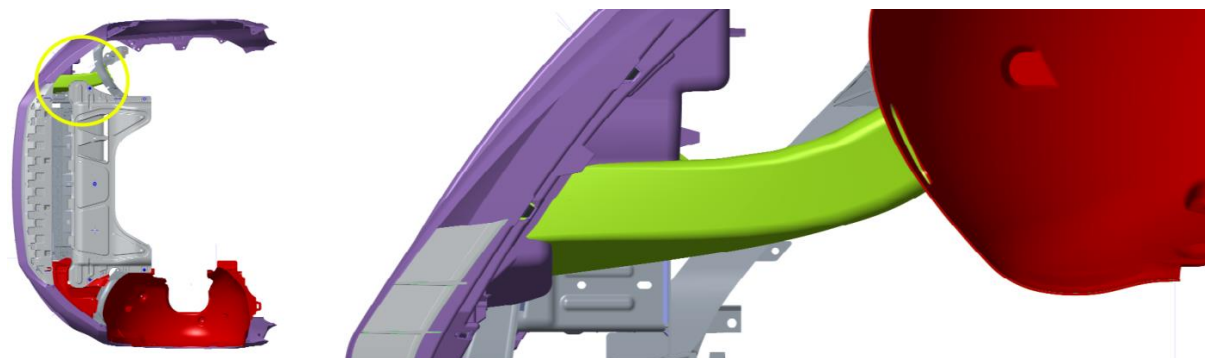
Obr. 62 Model kanálu

Přesná poloha kanálu v automobilu je zobrazena na Obr. 63. Pohled směřuje na vnitřní stranu tmavě šedé přední spodní mřížky obklopující mlhový světlomet. Kanál je navržen tak, aby svým tvarem přesně zapadal do této mřížky. Jeho vstupní část je upevněna pouze v mřížce. Na výstupu je kanál přichycen k červeně podbarvenému podběhu.



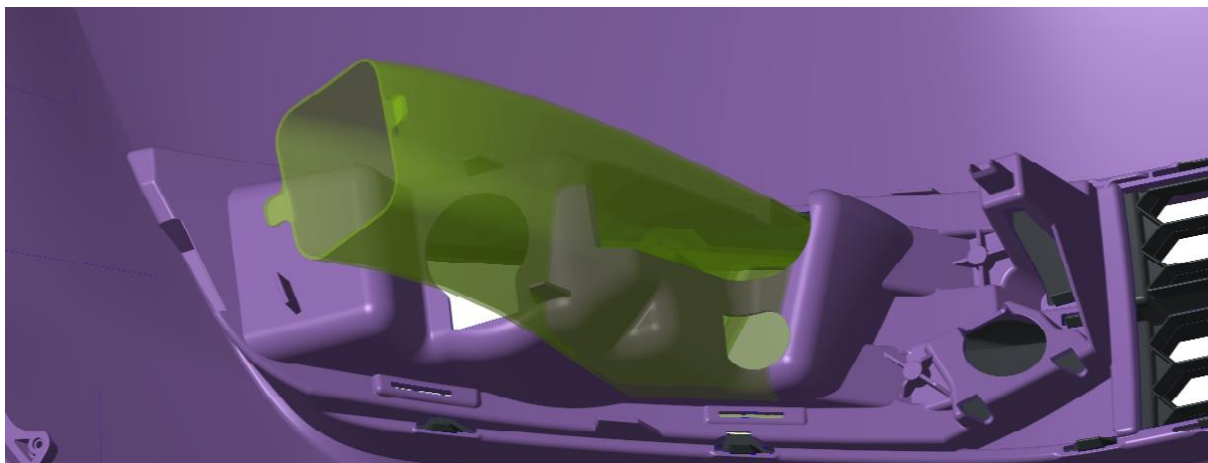
Obr. 63 Uložení kanálu v automobilu

Kanál je za začátku přímý a ke konci se pozvolna stáčí. Pohled zespoda na kanál umístěný v automobilu je zobrazen na Obr. 64. Fialová část modelu je přední nárazník. Tento průběh zakřivení byl zvolen z několika důvodů. Proud vzduchu se při průchodu kanálem stáčí a na výstupu tak proudí přímo k brzdě. Dalším důvodem je krátká délka kanálu. Pozvolné stáčení kanálu také omezuje vznik turbulentního proudění.



Obr. 64 Pohled zespoda na kanál umístěný v automobilu

Dalším důležitým hlediskem je, že takto zakřivený kanál nezasahuje do nosných částí automobilu. Jediná součást, se kterou kanál koliduje, je část předního nárazníku obklopující vnitřní stranu mlhového světlometu. Kolize kanálu s touto částí nárazníku je zobrazena na Obr. 65. Úchyty pro mlhový světlomet leží mimo kolidující oblast a je tedy možno po demontáži kanálu vrátit světlomet na původní místo. Vůz tak nebude jevit známky jakýkoliv úprav.



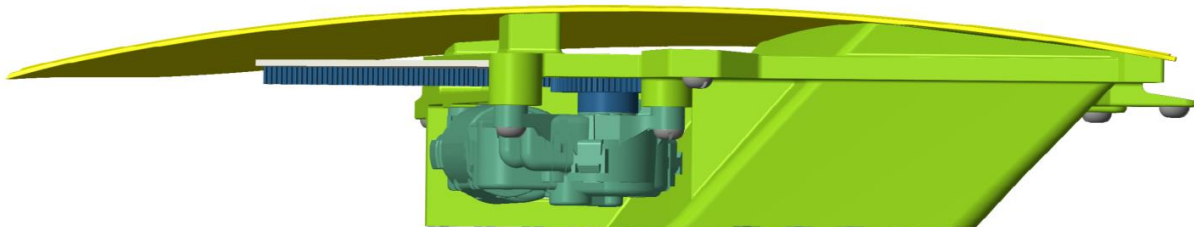
Obr. 65 Kolize kanálu s předním nárazníkem

VÝSTUP

Výstup z kanálu se nalézá ve výši brzdového třmene, což zajišťuje maximální efektivitu jeho chlazení. Hodnota hloubky, s jakou je výstup v podběhu zasazen, byla volena dle polohy výstupu sériového kanálu. Tato hloubka je pravděpodobně dimenzována pro pneumatiku širokou 205 milimetrů. Tento rozměr pneumatik se u Octavie využívá nejčastěji.

2.2.3 MECHANISMUS UZAVÍRÁNÍ

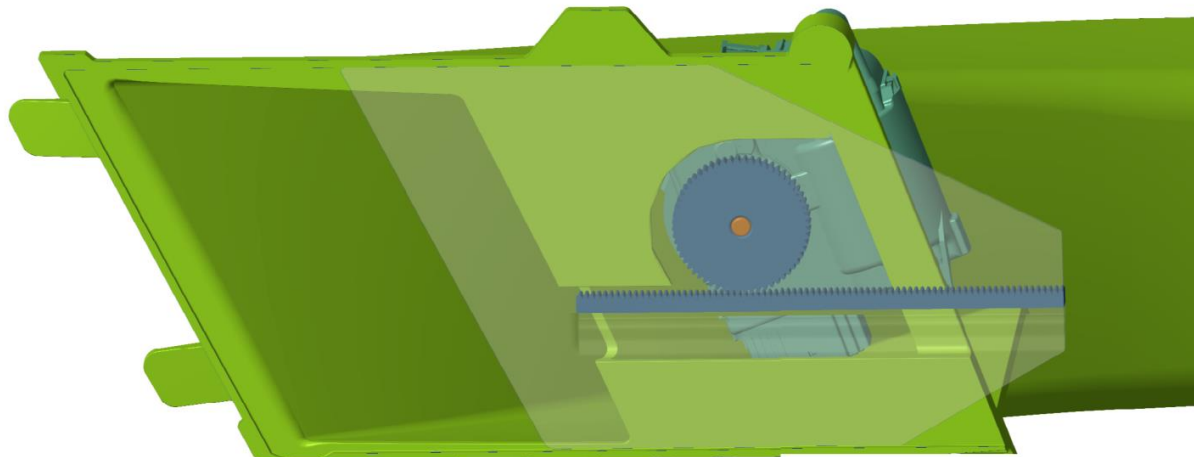
Jak bylo uvedeno výše, konstrukce zvoleného typu klapky vyžaduje velký zástavbový prostor, a to především díky místu potřebnému pro úplné vysunutí klapky z kanálu. Kvůli minimalizaci aerodynamického odporu by měla být klapka umístěna přímo na vstupu. V tomto případě to ovšem nebylo možné, protože díky zaoblení nárazníku v prostoru mlhovky zde nebyl dostatečný prostor pro vysunutí klapky. Díky vhodnému tvarování klapky ovšem bylo možno mechanismu uzavírání umístit velmi blízko samotnému povrchu nárazníku. Při uzavření kanálu má jeho zaslepená část hloubku 5,2 milimetru na jedné straně a 8,9 milimetru na straně druhé. Poloha mechanismu uzavírání kanálu vůči vstupu do kanálu je zobrazena v půdorysném pohledu na Obr. 66. Bílá součást je samotná klapka a modře vyznačené součásti tvoří soustavu ovládacího mechanismu. Klapka je zde zcela vysunuta z prostoru kanálu.



Obr. 66 Mechanismus uzavírání kanálu – klapka ve stavu otevřeno

Do pohybu klapku uvádí servomotor pomocí ozubeného kola a hřebenu. Hřeben je přichycen na lištu, která je vymodelována na zadní straně klapky. Na Obr. 67 je zobrazen průřez vodící lištou klapky. Je zde také viditelný tvar klapky a celý mechanismus ovládání. Modrozelená součást představuje servomotor, zatímco tmavě modrá představuje ozubený hřeben a ozubené

kolo. V levém dolním rohu vodící lišty je vytvořen otvor pro odvod případných nečistot či vody z drážky.

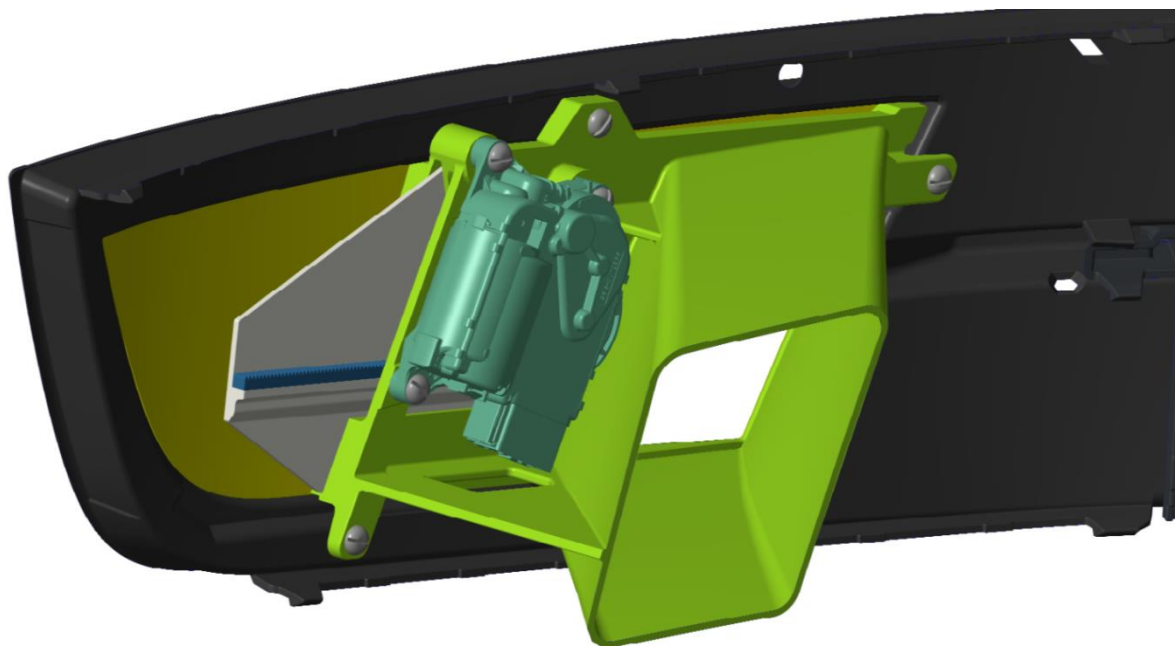


Obr. 67 Průřez vodící lištou

Modul použitého ozubeného převodu má hodnotu 0,7. Průměr roztečné kružnice kola byl zvolen 31,5 mm. Tato hodnota zajišťuje, že při otočení hřídele servomotoru přibližně o 340 stupňů klapka urazí celou svou dráhu. Tím je zajištěno, že při otáčení potenciometru, který je součástí servomotoru a určuje polohu klapky, nedojde k překročení jeho krajních hodnot a poloha klapky bude vždy jednoznačně definována.

Ozubené kolo a servomotor jsou propojeny pomocí hřídele, viz oranžová součást na Obr. 67. Ve výstupním hřídeli servomotoru je vytvořen funkční otvor hvězdčicového profilu, do kterého je zasazen druhý konec propojovacího hřídele se stejným profilem.

Celá sestava aktivně uzavíratelného kanálu pro chlazení brzd osazená ve spodní mřížce obklopující mlhový světlomet je zobrazena na Obr. 68.



Obr. 68 sestava aktivně uzavíratelného kanálu

Navržený model kanálu je určen pro chlazení levé brzdy automobilu. Jelikož tento kanál slouží jako prototyp určený především k testování, nebylo nutno vytvářet kanál i pro pravou část automobilu. Při měření bylo naopak výhodné mít na obou stranách automobilu různé kanály, jelikož mohly být jejich vlastnosti lépe porovnány.

2.3 VÝROBA KANÁLU

Kanál, klapka a spojovací hřídel jsou vytisknuty na 3D tiskárně. Jako materiál byl použit akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Kanál byl kvůli velkým rozměrům rozdělen na dvě části. Kvůli minimalizaci aerodynamického odporu byly funkční plochy kanálu a klapky zabroušeny, jelikož součásti vyrobené pomocí 3D tisku mají velkou drsnost povrchu.

Ozubený hřeben i ozubené kolo nebyly modelovány ale zakoupeny, jelikož výroba ozubení s malým modulem na 3D tiskárně nedává dostatečnou pevnost zubů. Využití ocelového kola a hřebenu bylo nevhodné z hlediska následné montáže jednotlivých dílů mechanismu uzavírání klapky dohromady. Proto byly zakoupeny součásti vyrobené z polyoxymetylénu, který vykazuje vysokou tuhost a nízké opotřebení oproti běžnému plastru.

Celá sestava kanálu před montáží je zobrazena na Obr. 69.



Obr. 69 Jednotlivé díly sestavy kanálu

2.4 MONTÁŽ KANÁLU NA TESTOVACÍ VOZIDLO

Nejprve byly smontovány součásti mechanismu ovládání klapky. Ozubený hřeben je připevněn na lištu na zadní straně klapky pomocí dvou válcových kolíků a lepidla. Kolíky zabraňují posunu hřebenu při působení velké síly od motoru a lepený spoj zabraňuje pohybu hřebenu ve svislém směru. Ozubený hřeben je hnán ozubeným kolem, které je upevněno na

spojovacím hřídeli pomocí improvizované závlačky. Pevné spojení servomotoru a spojovacího hřídele zajišťuje tvarový spoj.

Servomotor je ke kanálu připevněn pomocí tří šroubů, které jsou zašroubovány do předem vytvořených závitů. Motor lze tedy snadno odejmout, například je-li potřeba seřadit polohu klapky.

Přední část kanálu byla navržena tak, aby přesně zapadala do spodní mřížky vozidla, jak již bylo uvedeno výše. Poloha kanálu v mřížce je tedy pevně dána, což usnadnilo samotnou montáž kanálu na vozidlo. Kanál je připevněn k mřížce pomocí čtyř šroubů. Samotná krytka otvoru po mlhovém světlometu měla být vytisknuta na 3D tiskárně, ale nakonec byla vytvořena z plastového plátu. Tento plát, upravený do požadovaného tvaru, byl vlepen do mřížky. Vstupní otvor pro kanál byl vyříznut a přesně zabroušen.

Prototyp aktivního aerodynamického kanálu byl osazen na automobil Škoda Octavia modelový rok 2015, který je k dispozici v laboratořích Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Tento automobil je zobrazen na Obr. 70 během probíhající montáže kanálu.



Obr. 70 Škoda Octavia modelový rok 2015

Před samotnou montáží kanálu na automobil bylo potřeba odstranit část nárazníku kolidující s kanálem. Nárazník byl demontován z vozu a přebytečná část vyříznuta. Také se ukázalo, že je potřeba vyjmout nádržku pro kapalinu oštrikovače. Tento díl nebyl zahrnut v dodaném CAD modelu. Uložení kanálu v automobilu je zobrazeno na Obr. 71.



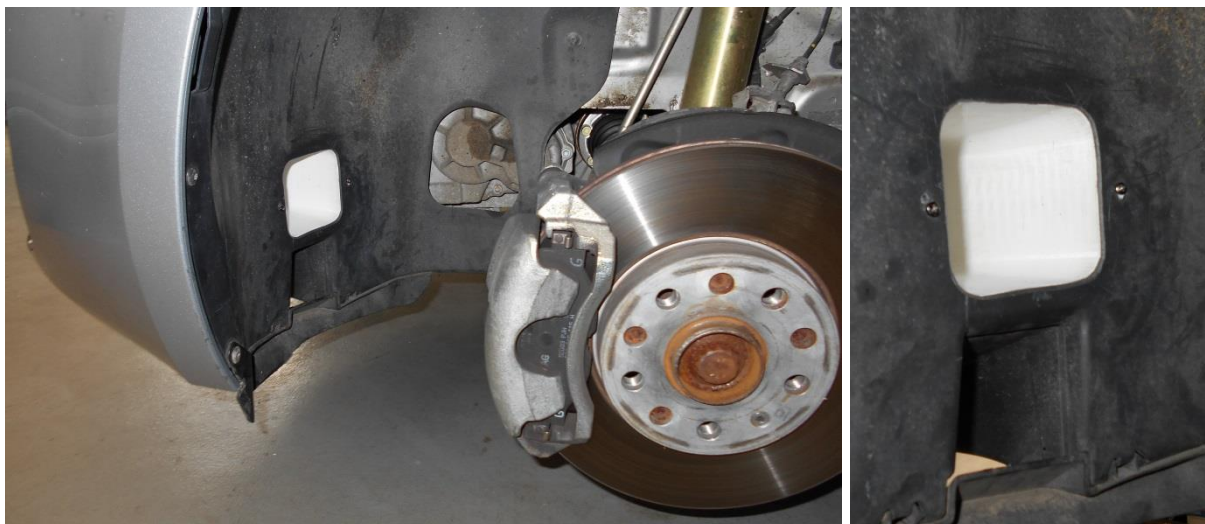
Obr. 71 Uložení kanálu v automobilu

Přední část kanálu byla do automobilu vsazena společně s přední mřížkou, viz Obr. 72.



Obr. 72 Přední spodní mřížka s připevněným kanálem

Zadní část kanálu je pomocí dvou šroubů přichycena k podběhu vozidla. Do podběhu bylo nutno vyřezat otvor pro výstup vzduchu z kanálu, viz Obr. 73.



Obr. 73 Vyústění kanálu v podběhu

Na Obr. 73 vpravo je zobrazen detail výstupního otvoru prototypového kanálu. Pod tímto výstupem se nachází výstup sériového kanálu pro chlazení brzd. Sériový kanál byl při testování vozu překryt krycí páskou.

Vstup do kanálu s částečně vysunutou klapkou je zobrazen na Obr. 74.



Obr. 74 Vstup do kanálu s částečně vysunutou klapkou

3 AKTIVNÍ REGULACE BRZDOVÉHO KANÁLU

Dalším cílem diplomové práce bylo navrhnout řídicí algoritmus aktivní regulace kanálu pro běžně dostupný programovatelný hardware.

Nejdříve bylo potřeba vytvořit návrh toho, jak bude aktivní regulace pracovat. Aby byla práce aktivního brzdového kanálu maximálně efektivní, je nutno přesně řídit jeho otevírání a zavírání. Kanál musí být otevřen dostatečně dlouhou dobu, aby mohly být brzdy potřebně ochlazeny, ale přitom by neměl být otevřen příliš dlouho, kvůli požadavku minimalizovat aerodynamický odpor vozidla.

Následně byl vybrán vhodný hardware, který by umožnil řídit klapku dle vytvořeného návrhu a pro tento hardware byl sestaven řídicí algoritmus.

3.1 PRINCIP ŘÍZENÍ AKTIVNÍ REGULACE

Pohyb klapky je řízen mikroprocesorem dle hodnot přetlaku v brzdovém systému a také dle rychlosti jízdy vozidla. Tyto hodnoty jsou získávány prostřednictvím sběrnice CAN. Mikroprocesor informace zpracovává a prostřednictvím elektronického obvodu řídí pohyb servomotoru. Součástí servomotoru je potenciometr, který přesně udává polohu klapky v každém okamžiku. Celý elektronický systém je napájen z palubní sítě vozidla. Jaký úkon má v danou chvíli mikroprocesor vykonat, je definováno v řídicím algoritmu.

Systém řízení kanálu začíná pracovat při sepnutí zapalování vozu do první polohy. Nezávisle na výchozí poloze klapky dojde nejprve k úplnému otevření kanálu. Tento stav je udržován až do okamžiku, kdy rychlost jízdy překročí hodnotu 50 kilometrů za hodinu.

Samotná aktivní regulace je uvedena do činnosti až při rychlostech jízdy nad 50 kilometrů za hodinu. Při překročení této hodnoty je otevírání a zavírání kanálu dále řízeno dle hodnoty přetlaku v brzdovém systému. Je-li přetlak větší než 6 barů, dochází k otevření kanálu. Kanál se uzavírá při poklesu hodnoty přetlaku pod 3 bary. Po otevření kanálu vždy nastává minutová prodleva, která slouží k dochlazení brzd. Přesný popis chování klapky v závislosti na hodnotě přetlaku včetně stavového diagramu je uveden níže.

Aktivní regulace nepracuje při nízkých rychlostech, jelikož se předpokládá, že se automobil pohybuje ve městě či v oblasti, kde je nutno dbát zvýšené pozornosti a brzdy se budou často využívat. Díky časové prodlevě potřebné pro dochlazení brzd by byl kanál při častém brzdění uzavřen jen nepatrné procento času. Aerodynamické ztráty jsou navíc při nízkých rychlostech jízdy nízké. Při těchto jízdních režimech je tak kanál plně otevřen.

3.2 ŘÍDICÍ ELEKTRONICKÝ OBVOD

Řídicí elektronický obvod byl sestaven z běžně dostupného elektronického hardwaru. Nejdříve byl vytvořen prototypový obvod pro ověření správné funkce hardwaru a softwaru. Poté vznikla verze hardwaru určená k experimentálnímu ověření přínosu aktivního kanálu.

Nejdůležitější součástí elektronického obvodu je deska plošného spoje s mikroprocesorem, který na základě signálů ze sběrnice CAN řídí pohyby servomotoru. Změna smyslu otáčení

CAN-BUS Shield neobsahuje řídicí mikroprocesor, a proto musí být propojen s Arduinem Uno.

Ve verzi elektronického hardwaru určené k experimentálnímu ověření, tedy ve finální verzi, bylo objemné Uno s nástavbou CAN-BUS Shield nahrazeno kompaktnější deskou Arduino Leonardo CAN BUS od výrobce HobbyTronic. Jedná se o jednoúčelovou desku, která je vybavena jak řídicím mikroprocesorem, tak CAN bus kontrolerem a je ji možno napájet 12 V.

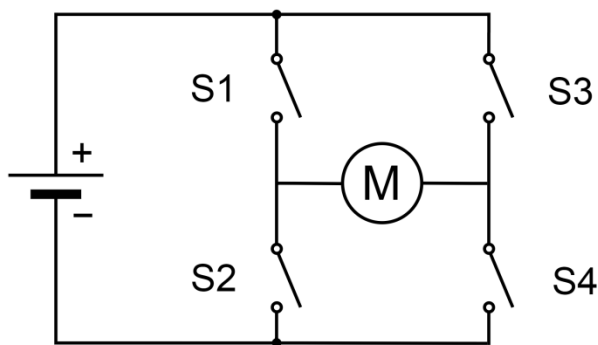
Kompaktnější deska byla zvolena s ohledem na minimalizaci rozměrů průmyslové krabičky, do které byl finální elektronický obvod umístěn.

Na Obr. 75 je vyznačeno, které vývody (piny) Leonarda byly využity. Piny D6 a D5 řídí směr otáčení servomotoru a pin D4 řídí jeho spouštění. Jedná se o digitální výstupy. Analogový vstup A0 čte hodnoty z potenciometru servomotoru. Potenciometr je napájen pomocí 5 V přímo z desky Leonardo, stejně jako integrovaný odvod s označením L293DNE. Piny CAN L a CAN H představují vstup pro příjem zpráv ze sběrnice CAN. Napětí z palubní sítě vozidla je přivedeno na napájecí piny ± 12 V.

3.2.2 INTEGROVANÝ OBVOD S H-MŮSTKEM

Jedná se o takzvaný motorový budič s kódovým označením L293DNE. Výrobce je společnost Texas Instruments. Tento integrovaný obvod může být napájen napětím v rozmezí 4,5 až 36 V a je tedy vhodný pro napájení 12 V z palubní sítě automobilu. [50]

Úkolem integrovaného obvodu je spouštět chod a měnit smysl otáčení servomotoru dle příkazů přicházejících z mikroprocesoru. Změna směru otáčení je realizována změnou polarity na svorkách elektromotoru. K řízení chodu elektromotoru nestačí samotný mikroprocesor, protože není schopen dodávat proud o dostatečné hodnotě. K tomuto účelu je využit H-můstek, který je součástí integrovaného obvodu L293DNE. Základní princip funkce H-můstku je zobrazen na Obr. 76.



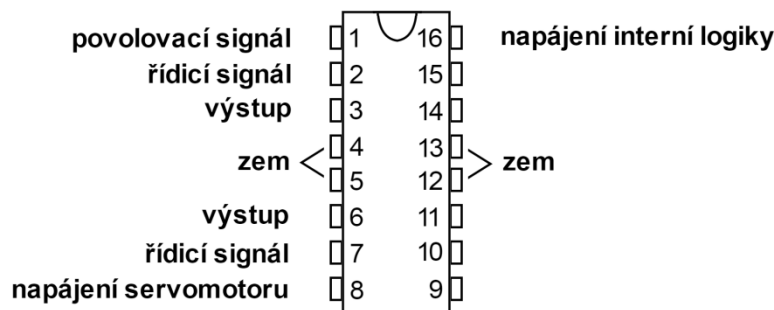
Obr. 76 Základní princip funkce H-můstku

Při sepnutí se současně spíná vždy jedna dvojice spínačů. Sepne-li dvojice S1 a S4, je kladný pól zdroje napětí spojen s levou svorkou motoru. Sepne-li dvojice S2 a S3, je kladný pól spojen s pravou svorkou.

V reálném H-můstku jsou jako spínače využity tranzistory. S ilustrací na Obr. 76 je patrné, že kdyby sepnuly oba spínače v jedné větvi, došlo by ke zkratu. Skutečné zapojení H-můstku je

proto složitější. Přesto je při návrhu obvodů s H-můstkem třeba vzít do úvahy, že při přepínání spínačů dochází krátkodobě k většímu namáhání elektronických součástek.

Schéma zapojení jednotlivých vývodů integrovaného odvodu je zobrazeno na Obr. 77.



Obr. 77 Zapojení jednotlivých vývodů integrovaného obvodu

Vývod číslo 1, 2 a 7 je propojen s mikroprocesorem prostřednictvím pinů desky Leonardo. Je-li přivedeno napětí na vývod číslo 1, elektromotor je uveden do chodu. Vývody 2 a 7 slouží pro řízení směru otáčení elektromotoru. Pokud je na vývod 2 přivedeno napětí logické hodnoty 1 a na vývod 7 logická hodnota 0, točí se motor jedním směrem. Pokud je logická hodnota 1 přivedena na vývod 7 a logická hodnota 0 na vývod 2, točí se motor směrem opačným.

Vývody 3 a 6 slouží jako výstup napětí o hodnotě 12 V na svorky elektromotoru. Toto napětí, kterým je servomotor napájen, je přivedeno do integrovaného obvodu z palubní sítě vozidla prostřednictvím vývodu číslo 8. Vývod 16 slouží k napájení interní logiky obvodu napětím 5 V z desky Leonardo. Vývody 4, 5, 12 a 13 slouží pro uzemnění integrovaného odvodu.

CHLADIČ

Pro spolehlivou funkci integrovaného obvodu je nutné využít chladič, protože součástkou protékají velké proudy a dochází k jejímu ohřevu. Chladič byl vytvořen dle specifikace na stránkách výrobce. Jedná se o vhodně tvarovanou desku potaženou vrstvou mědi o tloušťce 35 μm . [50]

3.2.3 KONDENZÁTORY

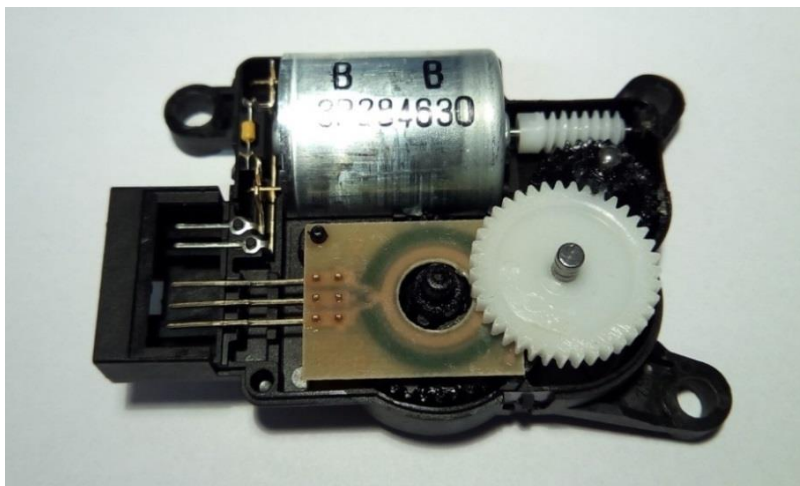
Součástí elektronického obvodu jsou také dva kondenzátory o velikosti 1 μF a 100 nF, které jsou připojeny mezi napájecí vývody integrovaného obvodu s H-můstkem a záporný pól napájecího zdroje. Účelem tohoto zapojení je filtrace šumu, který by přes napájecí vývody mohl pronikat do integrovaného obvodu. Kapacity kondenzátorů jsou zvoleny dle specifikace integrovaného odvodu.

3.2.4 VYPÍNAČ

Vypínač umožňuje odpojit elektronický obvod od napětí bez potřeby vypojení přívodního kabelu.

3.2.5 SERVOMOTOR

Jedná se o servomotor Denso 5Q0907511AND8 využívaný koncernem Volkswagen pro pohon některých automobilových prvků. Většinou se jedná o prvky, které jsou součástí topného a klimatizačního systému. Servomotor je tedy zkonstruován pro využití v automobilech, což je výhodné hlavně z hlediska jeho napájení, protože může být připojen k palubnímu napětí vozu. Servomotor je zobrazen na Obr. 78.



Obr. 78 Servomotor Denso 5Q0907511AND8

Samotný servomotor se skládá z elektromotoru, potenciometru a složeného ozubeného převodu do pomala, viz Obr. 78 vlevo. Potenciometr se otáčí společně s elektromotorem a snímá tak polohu natočení výstupního hřídele. Složený převod je tvořen třemi kontaktními dvojicemi ozubených kol.

POLOHA Klapky

Aktuální poloha klapky je zjišťována pomocí potenciometru servomotoru. Potenciometr během jedné své otáčky o 360 stupňů nabývá hodnot od 0 do 5 V. Napětí na potenciometru je snímáno pomocí analogového vstupu A0 na desce Arduino, kde je analogová hodnota napětí interpretována digitálně jako celé číslo z intervalu 0 až 1023. Mechanismus pohybu klapky byl navržen tak, aby při plném otevření či zavření nedošlo k tzv. přetečení hodnot potenciometru, tedy k situaci, kdy by potenciometr provedl celou otáčku a následující hodnota by byla interpretována číslem z opačného konce intervalu. Proto se klapka nachází v zavřeném stavu při dosažení hodnoty 45 a při hodnotě 980 je klapka zcela otevřena. Tím je zajištěno, že se potenciometr bude vždy pohybovat pouze v tomto rozmezí hodnot.

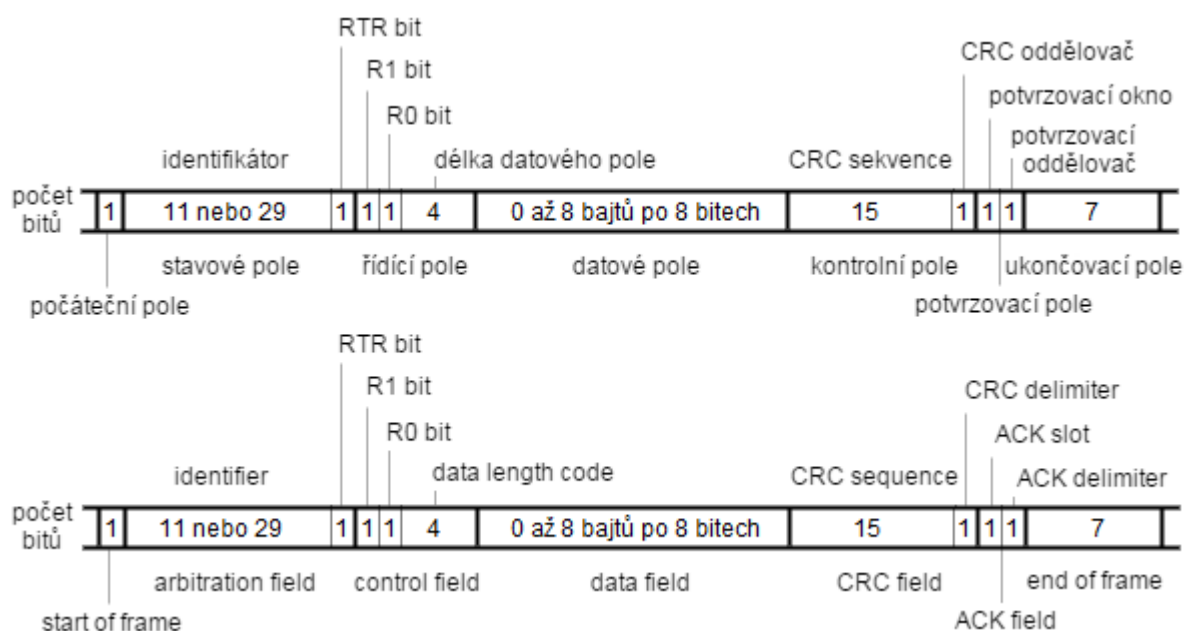
3.3 PŘÍJÍMÁNÍ ZPRÁV ZE SBĚRNICE CAN

Pohyb klapky je řízen na základě signálů přicházejících ze sběrnice CAN.

CAN bus je datová sběrnice vytvářející páteřní síť, ke které jsou připojeny všechny elektronické prvky automobilu. Prvky mohou prostřednictvím této sítě navzájem komunikovat. Sběrnice je fyzicky tvořena dvěma vodiči v provedení „kroucené dvojlinky“, kvůli minimalizaci elektromagnetického rušení. Vodiče jsou označovány jako CAN H (vyšší

napětí) a CAN L (nižší napětí) a jsou na obou koncích propojeny zakončovacími odpory o velikosti 120 Ω , které eliminují odrazy ve vedení. [49]

Elektronické prvky posílají data po sběrnici v podobě zpráv. Každý typ zprávy má jedinečný identifikátor (ID). Zpráva představuje rámec sériové posloupnosti jedniček a nul, které jsou seskupeny do několika polí, viz Obr. 79. Každá zpráva začíná jedním počátečním bitem. Následuje skupina bitů, která udává identifikátor zprávy. Identifikátor může být tvořen buď 11 bity ve standartním formátu – specifikace CAN 2.0 A, nebo 29 bity ve formátu rozšířeném – specifikace CAN 2.0 B. Klíčové informace zprávy jsou obsaženy v datovém poli. To může být tvořeno až osmi bajty v závislosti na délce zprávy. Ostatní bity určují například vlastnosti zprávy či slouží jako kontrola neporušenosti zprávy. [49]



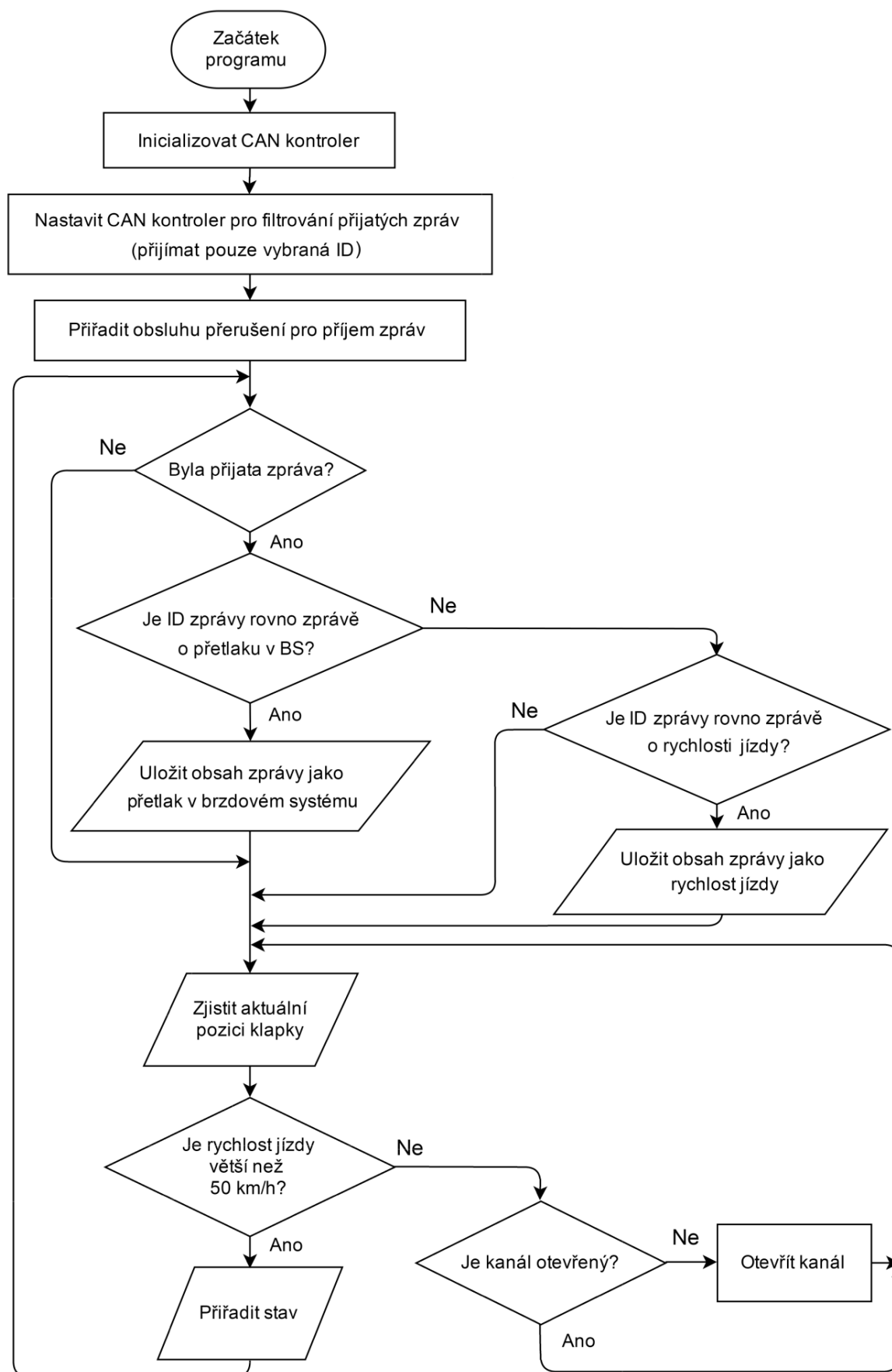
Obr. 79 Struktura CAN zprávy

Výše uvedený formát zprávy je předepsán normou, ovšem vlastní systém kódování zpráv, jakým je například ID konkrétní zprávy, již normován není. Bylo tedy potřeba zjistit číslo identifikátoru zprávy, která obsahuje informace o přetlaku v brzdovém systému a o rychlosti jízdy. K tomuto účelu byl využit interní dokument společnosti Škoda Auto a.s., ze kterého byly příslušné hodnoty vyčteny.

Zprávy ze sběrnice CAN jsou přijímány CAN kontrolerem. Ten zprávy preposílá dále do mikroprocesoru.

3.4 ŘÍDICÍ ALGORITMUS

Řídicí algoritmus představuje úkony mikroprocesoru, kterými je řízen pohyb klapky. Jednotlivé kroky, které algoritmus provádí, jsou znázorněny prostřednictvím vývojového diagramu na Obr. 80. Pomocí Arduino IDE byl na základě navrženého algoritmu vytvořen program, který byl následně nahrán do mikroprocesoru na desce Arduino. Kód programu je uveden v příloze.



Obr. 80 Vývojový diagram

Okamžitě po startu programu zahájí svou činnost CAN kontroler.

Následně dojde k nastavení filtrování zpráv na kontroleru. Filtrování zpráv je nutné, protože u moderních automobilů jsou po sběrnici CAN posílány až stovky různých zpráv a aktualizace každé zprávy probíhá v rámci milisekund. Aby nemusel řídicí mikroprocesor u každé zprávy zjišťovat, zda je relevantní, provádí filtrování zpráv již CAN kontroler. Mikroprocesor by nemusel zvládnout vyhodnotit takové množství informací.

Filtrování je nastaveno tak, že CAN kontroler z celé zprávy přečte pouze její ID. Pokud číselná hodnota ID odpovídá identifikátoru zprávy udávající tlak v brzdovém systému či rychlost jízdy, poskytne CAN kontroler zprávu procesoru. O ostatních zprávách, jejichž ID neodpovídá, se procesor vůbec nedozví.

V dalším kroku je pro příjem zpráv do procesoru nastaveno tzv. přerušení. V podstatě jde o to, aby zodpovědnost za výměnu zpráv mezi CAN kontrolerem a procesorem nesl CAN kontroler. V principu to znamená, že CAN kontroler přijme zprávu, uvědomí o tom procesor a teprve tehdy procesor přeruší programovou smyčku a načte zprávu. Pokud by obsluha příjmu zpráv neprobíhala v přerušení, musel by procesor v každém běhu smyčky kontrolovat, jestli nebyla přijata nějaká zpráva, což by zbytečně zvyšovalo jeho zátěž.

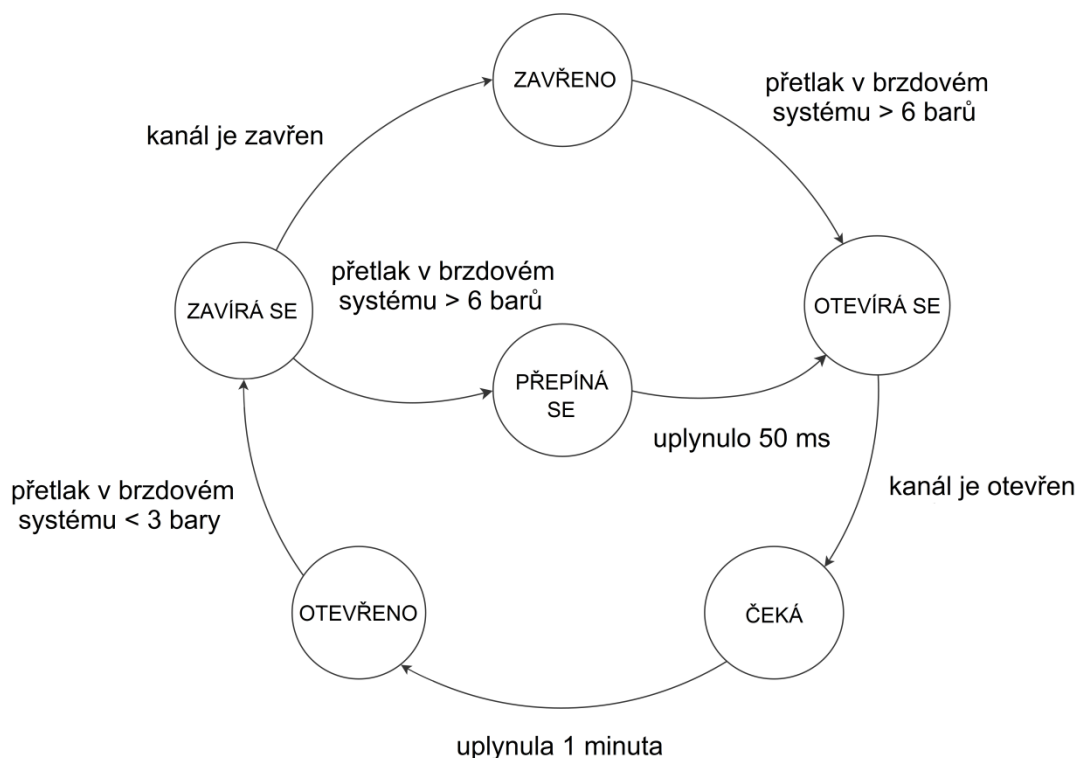
Všechny výše popsané úkony proběhnou pouze jednou při startu programu. Kroky, které budou následovat nyní, již probíhají v neustále se opakující programové smyčce.

Pokud CAN kontroler přijal nějakou zprávu, uloží procesor na začátku programové smyčky informaci obsaženou ve zprávě do odpovídající proměnné. Program dále uloží hodnotu z potenciometru do proměnné určující polohu klapky.

Dle rychlosti jízdy je rozhodnuto, zda má aktivní regulace pracovat. Pokud je rychlost jízdy nižší než 50 kilometrů za hodinu, dojde dle informací o poloze klapky buď k otevření kanálu, anebo je již kanál zcela otevřen. Poté se program vrací na začátek smyčky a znovu ověřuje polohu a rychlost jízdy. Dokud se rychlosti jízdy nezvýší nad hodnotu 50 kilometrů v hodině, zůstane kanál buď zcela otevřen, nebo se bude nacházet ve stavu otevírání. Až se rychlost jízdy zvýší nad definovanou hodnotu, přejde řídicí algoritmus do fáze, kdy na základě polohy klapky a tlaku v brzdovém systému rozhoduje, jestli má být klapka otevřena nebo zavřena. Podle toho nastaví řídicí signály do příslušného stavu. Metodika přiřazování jednotlivých stavů je znázorněna pomocí stavového diagramu zobrazeného na Obr. 81.

Je-li kanál ve stavu *ZAVŘENO*, systém čeká na hodnotu tlaku, která bude větší než definovaných 6 barů. Po překročení této hodnoty systém přechází do stavu *OTEVÍRA SE*. Jakmile je kanál zcela otevřen, dochází k odpočtu jedné minuty, která představuje interval nutný pro ochlazení brzd. Systém se nyní nachází ve stavu *ČEKÁ*. Po uplynutí tohoto časového intervalu přejde systém do stavu *OTEVŘENO*. Tento stav se nemění, pokud je tlak v brzdovém systému větší než 3 bary. Rozdíl mezi hodnotami tlaku při uzavírání a otevírání je nastaven proto, aby nedocházelo k neustálým přeskokům mezi jednotlivými stavy v případě, že se brzdový tlak bude pohybovat kolem operační hodnoty. Jakmile tlak klesne, stav systému se změní na *ZAVÍRA SE*. Ze stavu uzavírání je možno přejít jednak do stavu *ZAVŘENO*, ale také do stavu *PŘEPÍNÁ SE*. Do zavřeného stavu se systém dostává, setrvá-li tlak v brzdovém systému pod hodnotou 3 bary až do úplného uzavření kanálu. Pokud tlak během uzavírání naroste nad 6 barů, dojde k přechodu systému do stavu *PŘEPÍNÁ SE*. V tomto stavu systém setrvává 50 milisekund a poté přejde do stavu

OTEVÍRA SE. Stav přepínání byl definován, aby nedošlo k náhlé změně smyslu otáčení elektromotoru při přechodu ze stavu uzavírání do stavu otevírání. Jak bylo uvedeno výše v kapitole 3.2.2, při náhlé změně směru otáčení elektromotoru dochází k většímu namáhání elektronických součástek uvnitř integrovaného obvodu. Setrvání servomotoru v nehybném stavu po dobu 50 milisekund zajišťuje, že se v dané větvi H-můstku nejprve zavře jeden tranzistor a pak až se otevírá druhý.



Obr. 81 Stavový diagram

Je vhodné připomenout, že toto přiřazování stavů probíhá pouze do chvíle, dokud rychlost jízdy neklesne pod hodnotu 50 kilometrů za hodinu.

Přiřazování stavů je v kódu programu realizováno pomocí konstrukce Switch Case. Nejdříve jsou definovány názvy jednotlivých stavů a poté je u každého stavu deklarováno, jaké hodnoty má procesor přiřadit k výstupním řídicím proměnným. Tím programová smyčka končí a pokračuje opět znovu od výchozího kroku, kdy se v případě, že CAN kontroler přijal zprávu, načte hodnota přetlaku v brzdovém systému nebo rychlost jízdy.

Běh algoritmu je ukončen při vypnutí zapalování. K restartu algoritmu tak dochází při každém novém sepnutí zapalování do první polohy.

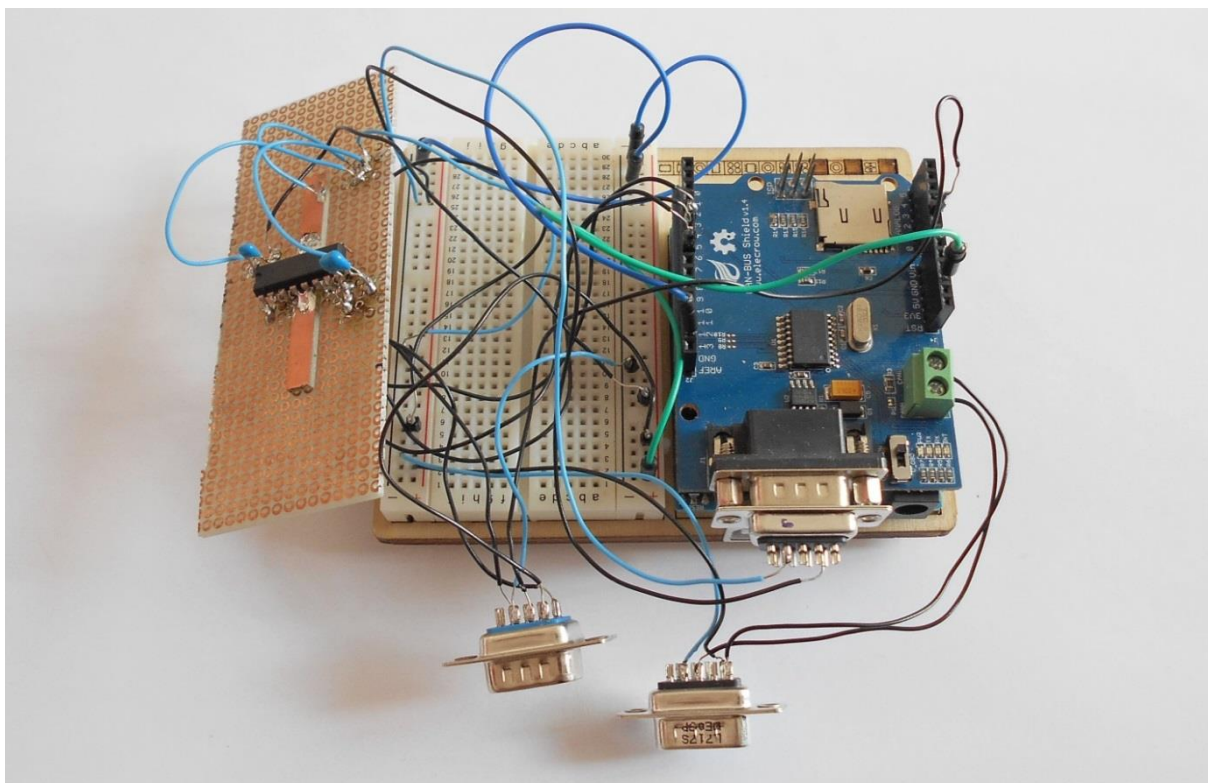
Při vytváření programu byla využita volně dostupná knihovna funkcí s názvem *mcp_can*, která není výchozí součástí Arduino softwaru. Tato knihovna definuje základní funkce potřebné pro činnost desky Leonardo CAN BUS a je k dispozici na stránkách HobbyTronic.

3.5 VÝROBA ŘÍDICÍHO ELEKTRONICKÉHO OBVODU

Po sepsání řídicího algoritmu bylo nutno vytvořit řídicí elektronický obvod, který umožní ovládání aktivního kanálu.

Nejdříve byl vyroben pouze prototypový hardware, který sloužil k ověření správnosti funkce a zapojení všech komponent obvodu. Tento hardware je zobrazen na Obr. 82. Jak již bylo zmíněno výše, tento obvod využíval Arduino Uno a nástavbu CAN-BUS Shield v1.4. Obvod byl sestaven s pomocí nepájivého kontaktního pole. Integrovaný obvod s H-můstkem byl osazen na prototypovou desku, jelikož tato součástka vyžaduje pro svoji funkci chladič. K prototypové desce byly připájeny také dva kondenzátory pro filtraci šumu. Napájení bylo do obvodu přivedeno z palubní sítě prostřednictvím nepájivého pole.

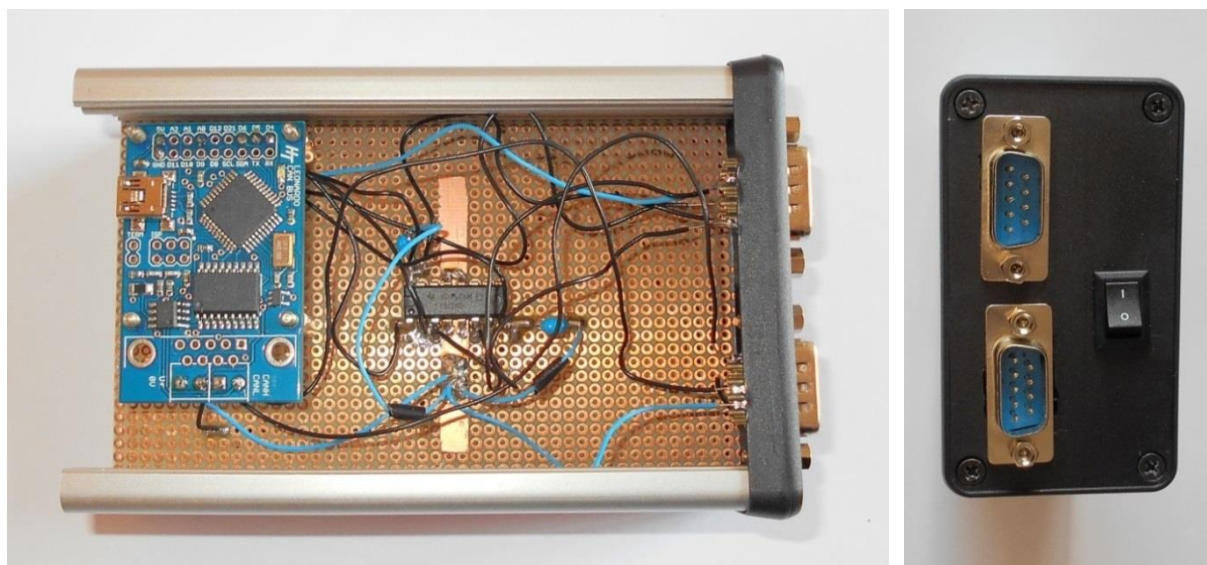
Prototypový hardware obsahoval dva devíti-pinové konektory. Jejich zapojení bylo shodné s finální verzí hardwaru, viz Obr. 84.



Obr. 82 Prototypový hardware

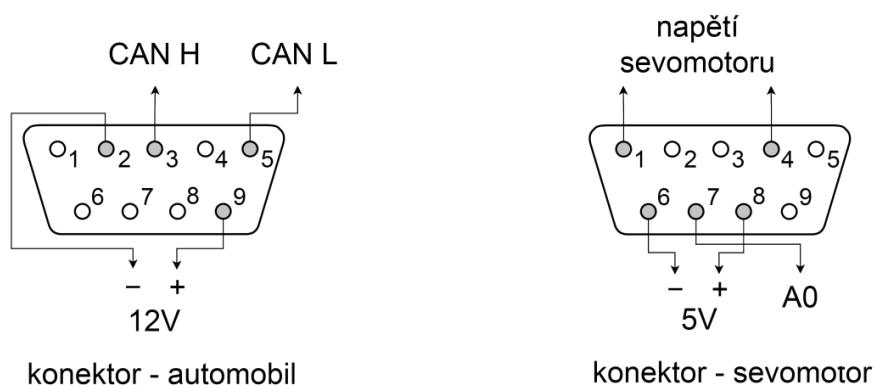
Jelikož prototypová verze byla osazena na nepájivém poli, nebyla vhodná pro testování automobilu v pohybu.

Finální verze hardwaru určená pro experiment je již umístěna v průmyslové hliníkové krabici a všechny komponenty obvodu jsou připájeny k prototypové desce, viz Obr. 83. Tento hardware využívá desku Arduino Leonardo CAN BUS. Přesné schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 75.



Obr. 83 Finální hardware

Z krabičky vystupují pouze dva devíti-pinové konektory a vypínač viz Obr. 83 vpravo. Přesné zapojení pinů obou konektorů je zobrazeno na Obr. 84. Konektor vlevo slouží pro připojení sběrnice CAN a 12 V z palubní sítě. Konektor vpravo slouží k propojení hardwaru se servomotorem.



Obr. 84 Zapojení pinů konektorů

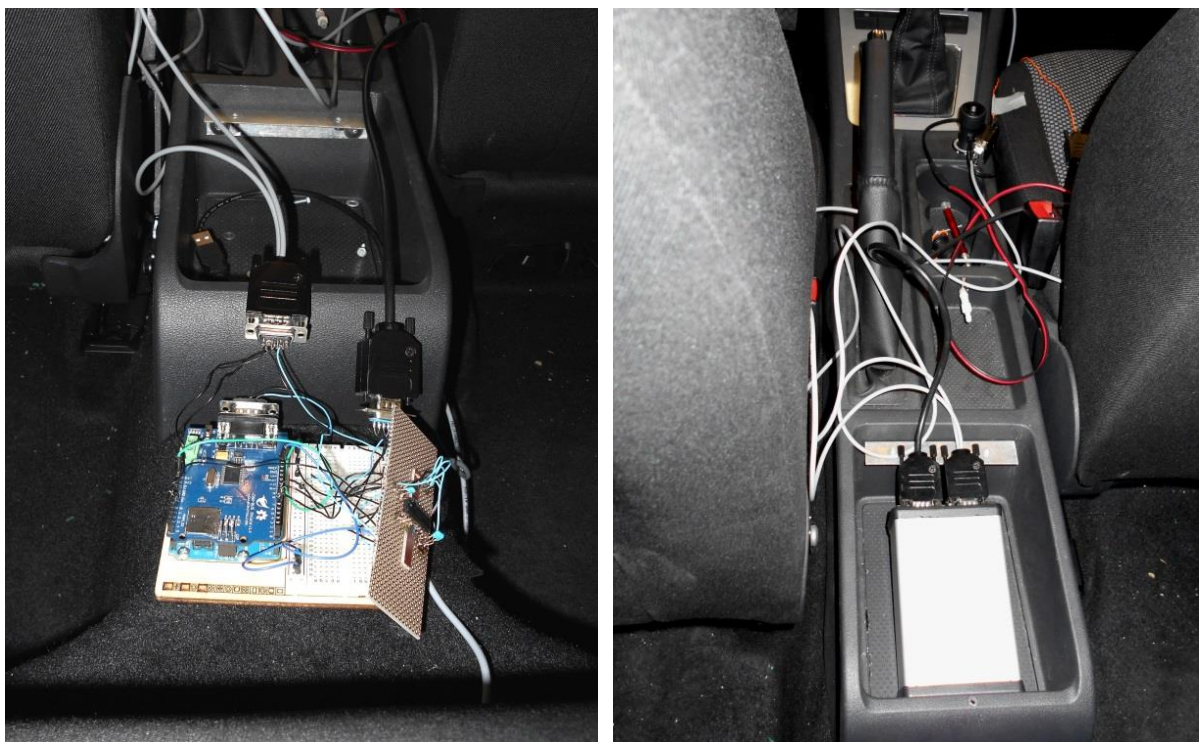
3.6 TESTOVÁNÍ ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Samotné ověřování funkce softwaru i hardwaru probíhalo v několika etapách.

První testování probíhalo bez automobilu. Prototypový hardware a základní funkce řídicího algoritmu byly odzkoušeny pomocí upravené testovací verze řídicího algoritmu. Testovací algoritmus umožňoval uživateli prostřednictvím počítače vysílat informace do procesoru, čímž simuloval situaci, kdy data přicházejí z CAN kontroleru. Informace o poloze klapky byly zobrazovány na monitoru počítače. Servomotor byl napájen pomocí 9V baterie.

Následně byl prototypový hardware i řídicí software odzkoušen na stojícím vozidle. To bylo možné, jelikož do řídicího algoritmu prozatím nebyla implementována funkce, která by

omezovala činnost klapky při jízdě nižší rychlostí, než je 50 kilometrů v hodině. Na Obr. 85 vlevo je uvedena fotografie z testování prototypové verze hardwaru ve vozidle. Software byl odladěn, aby správně reagoval na podněty automobilu. Byly nastaveny krajní hodnoty potenciometru a hraniční hodnoty přetlaku v brzdovém systému pro otevření a uzavření kanálu.



Obr. 85 Testování hardwaru a softwaru v automobilu – prototyp a finální verze hardwaru

4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ PŘÍNOSU KANÁLU

Po montáži kanálu na automobil a úspěšném ověření funkce aktivní regulace bylo možno otestovat parametry vytvořené konstrukce.

Cílem experimentu bylo zjistit, o jakou hodnotu klesne teplota brzdy v případě využití navrženého prototypu brzdového kanálu oproti teplotě brzdy ochlazované pomocí kanálu sériového.

Měřenými parametry byla teplota brzd a také rychlost proudění vzduchu v chladicím kanálu. Měřicí jednotka, která byla využita při experimentu, měřila velké množství dalších parametrů souvisejících s pohybem automobilu.

Měření aerodynamických parametrů provedeno nebylo, jelikož snížení odporu automobilu při uzavřeném brzdovém kanálu je relativně malé v porovnání s hodnotou celkového odporu. Aerodynamický přínos uzavíratelného kanálu by bylo možno otestovat pouze v aerodynamickém tunelu. Dojezdová zkouška, která je alternativou k testování aerodynamiky v tunelu, nedává dostatečně přesné výsledky pro takto malé změny aerodynamických veličin. Nebylo tedy možné přesně určit, o jakou hodnotu se sníží koeficient odporu vozu při uzavření klapky. Lze ovšem předpokládat, že se snížení pohybuje v řádu setin. I takto nepatrný pokles je významný z hlediska snížení spotřeby paliva a tím i snížení produkovaných emisí.

4.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

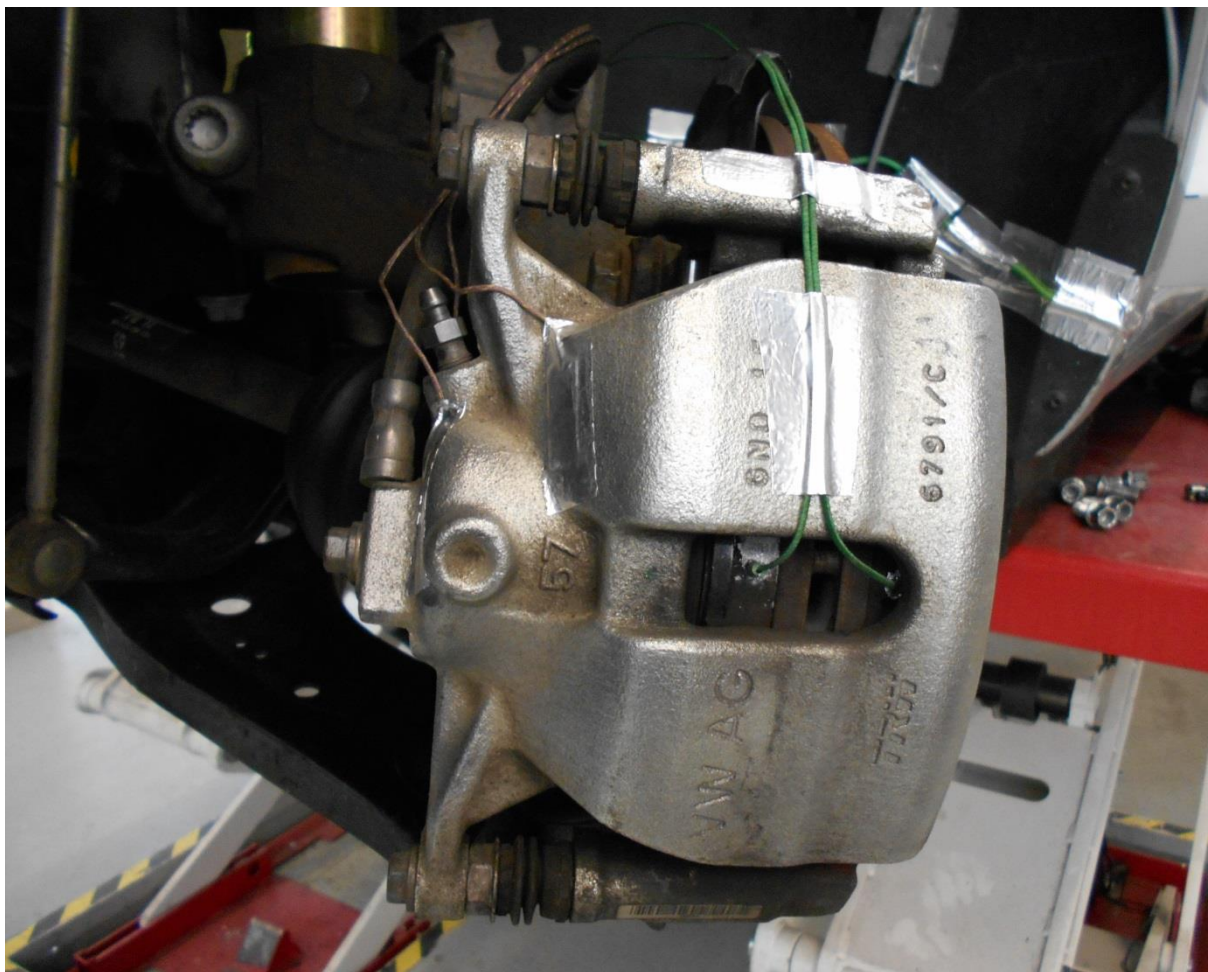
Vůz byl před samotným měřením osazen příslušnými senzory.

4.1.1 MĚŘÍCÍ SENZORY

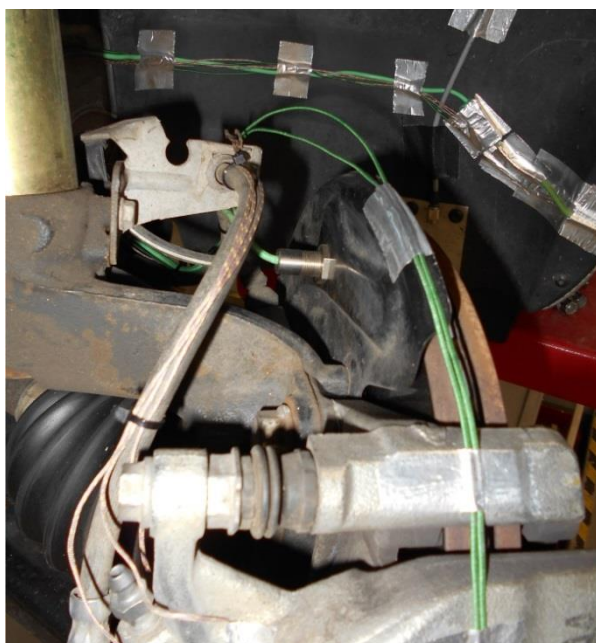
Teplota byla měřena v šesti různých bodech na obou předních brzdách. Tři senzory zaznamenávaly tepotu brzdového třmene, dva teplotní senzory byly umístěny na brzdových destičkách a poslední senzor měřil teplotu brzdového kotouče. Jako teplotní senzory byly využity termočlánky typu k, které umožňují měřit široké rozpětí teplot.

Termočlánek je tvořen dvěma odlišnými kovovými materiály, které jsou na jednom konci spojeny. Při rozdílné teplotě spojení a volných konců materiálů lze naměřit na volných koncích napětí. Hodnota generovaného napětí odpovídá změně teploty spojení ve srovnání s referenční teplotou na studeném konci senzoru.

Přední brzda automobilu Škoda Octavia osazená senzory je zobrazena na Obr. 86. Zde jsou dobře patrné dva senzory pro měření teploty brzdových destiček. Termočlánek je usazen ve vyvrtaném otvoru v destičce a zbylý prostor je vyplněn teplovodivou pastou. Na obrázku jsou zřetelné také dva senzory pro měření teploty brzdového třmene, které jsou připevněny k povrchu třmene pomocí fixační pásky. Třetí senzor byl umístěn na zadní část třmene. Při pohledu z pozice řidiče byl nejvzdálenější senzor na třmeni označen číslem 1, prostřední senzor číslem 2 a senzor nejbližší řidiči měl číslo 3.



Obr. 86 Brzda osazená teplotními senzory



Obr. 87 Senzor teploty kotouče – vlevo umístění na Octavii, vpravo kontakt s kotoučem [65]

Teplota brzdového kotouče byla měřena pomocí senzoru určeného právě k tomuto účelu. Jeho uchycení na Octavii je zobrazeno na Obr. 87 vlevo. Jelikož je senzor umístěn v krycím plechu brzdy, je na tomtéž obrázku vpravo ilustrativně zobrazen senzor toho typu v kontaktu s brzdovým kotoučem. Protože kotouč za jízdy rotuje, má senzor odpruženou přední měřící část. Při rotaci kotouče se senzor vlivem tření zahřívá a tím mírně zkresluje výsledky.

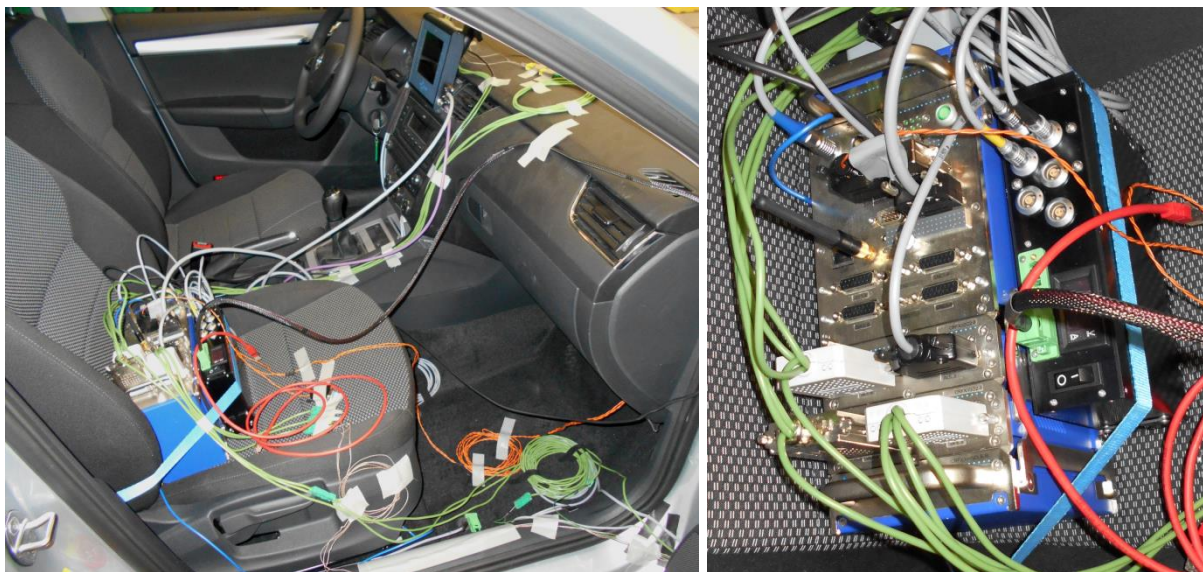
Rychlost vzduchu proudícího v kanále byla měřena na výstupu pomocí termoanemometru od výrobce TSI. Nejdříve byla změřena rychlost proudění v sériovém kanále a poté byl termoanemometr přemístěn na výstup aktivního kanálu, viz Obr. 88.



Obr. 88 Umístění termoanemometru pro měření rychlosti proudění v kanálech

4.1.2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Při měření byla využita základní jednotka imc CRONOSflex, vybavená externím displejem a dvěma CAN vstupy. Tyto vstupy sloužily pro ukládání informací z automobilu a z jednotky inerciálního navigačního systému. Základní jednotka je vybavena dvěma 8-kanálovými kartami pro měření napětí a teplot. Výrobcem jednotky inerciálního navigačního systému je společnost SBG Systems. Měřicí zařízení bylo napájeno 12 V ze stabilizovaného zdroje. Měřicí zařízení instalované v automobilu je zobrazeno na Obr. 89.



Obr. 89 Měřicí zařízení

4.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ

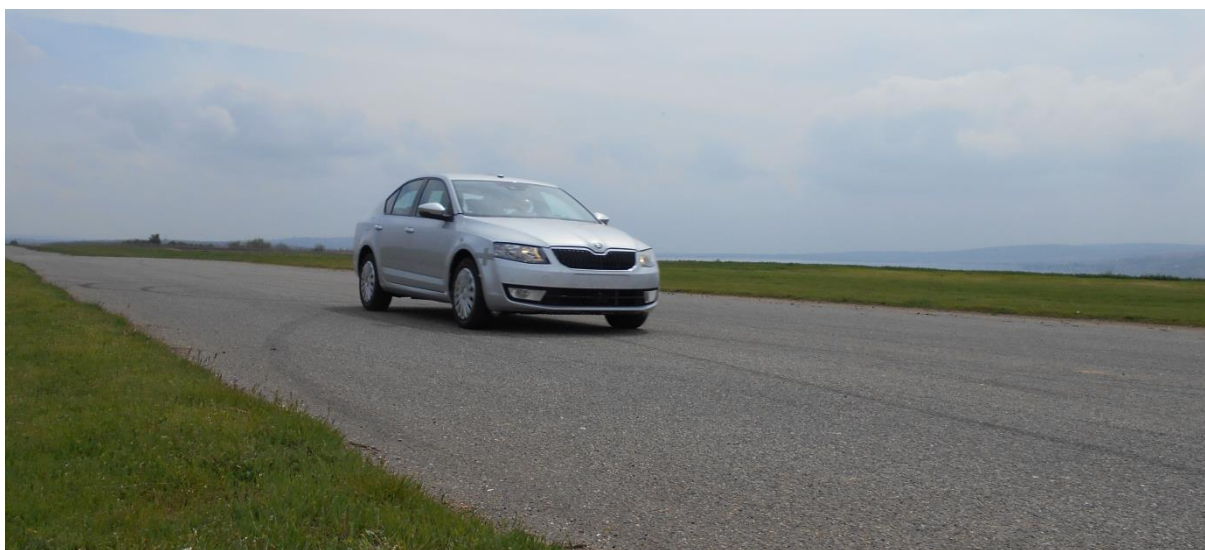
Měření probíhalo na rovinném asfaltovém povrchu. Délka testovací trati dosahovala přes 400 metrů. Automobil tak bylo možno rozjet na dostatečně vysokou rychlost jízdy. Letecký snímek testovací trati je zobrazen na Obr. 95. Octavia již byla osazena kompletní spodní mřížkou a podvozkovým motorovým krytem, viz Obr. 90. Na voze byla nasazena ocelová kola s ozdobnou plastovou krytkou.



Obr. 90 Automobil připravený k měření parametrů kanálu

Měření bylo zahájeno vždy, když automobil dosáhl rychlosti přibližně 20 km/h. Poté se vůz rozjel na rychlost přesahující 90 km/h a následně začal brzdit maximální silou až do úplného zastavení. Po zastavení se vůz rozjel na rychlost 80 km/h a tuto rychlost udržoval po dobu minimálně 10 sekund. Měření bylo zopakováno desetkrát.

Nejdříve byly měřeny parametry sériového automobilu. Aktivní kanál byl uzavřen a původní chladicí kanál nebyl zatím zaslepen, viz Obr. 88 vlevo. Po vykonání deseti opakování byl automobil odstaven. Sériový chladicí kanál byl zaslepen a chladicí vzduch k levé brzdě nyní přiváděl navržený prototypový kanál, viz Obr. 88 vpravo. Aktivní regulace byla deaktivována, aby kanál zůstal po celou dobu měření otevřen. Měření s prototypovým kanálem probíhalo stejně, jako měření kanálu sériového. Při obou typech měření byla pravá brzda ochlazována pomocí sériového kanálu. Samotný průběh testování je zachycen na Obr. 91.



Obr. 91 Testování parametrů kanálu

4.3 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

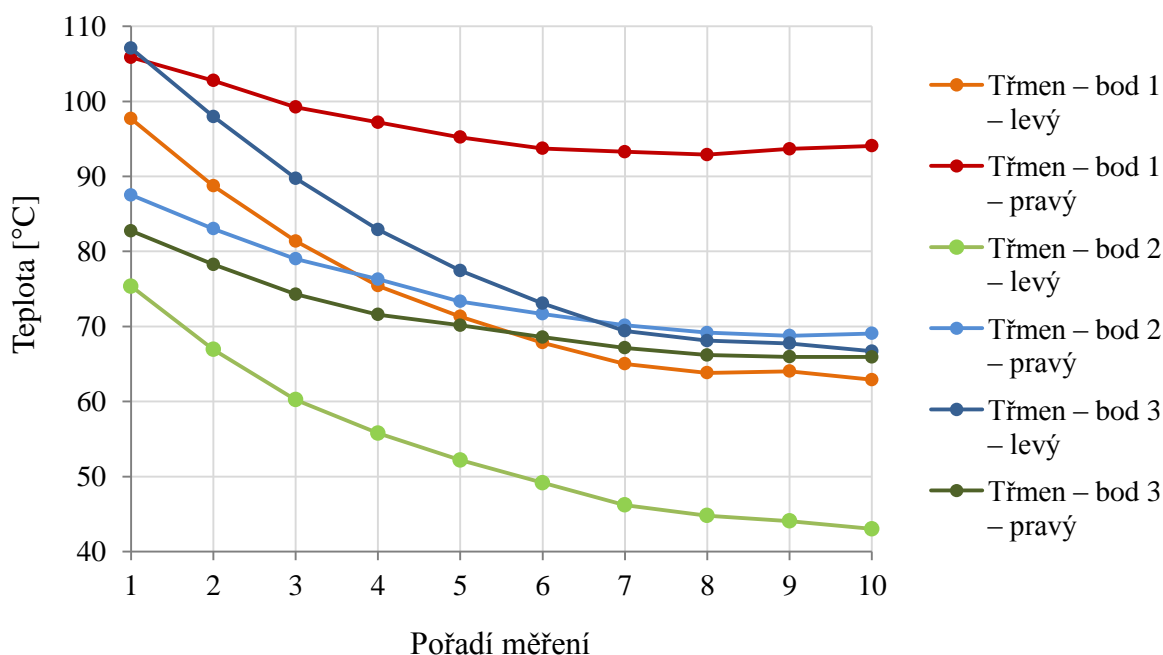
Měření bylo zahájeno vždy, když automobil dosáhl rychlosti okolo 20 km/h a bylo ukončeno přibližně po 11 sekundách konstantní jízdy rychlostí okolo 80 km/h. Celé měření probíhalo přibližně jednu minutu. Vzorkovací frekvence odpovídala 100 Hz.

Již při samotném měření se ukázalo, že levá přední brzda se zahřívá více, než ta pravá. Tento jev byl způsoben neseřízenou brzdou silou na předních kolech. Levá brzda vytvářela větší brzdovou sílu a vozidlo se tak při brzdění stácelo k levé straně, což je patrné i z naměřeného průběhu rychlosti stáčení vozidla. Průběhy teplot v jednotlivých bodech pravé a levé brzdy v závislosti na čase jsou velmi podobné, jen jsou vůči sobě posunuty.

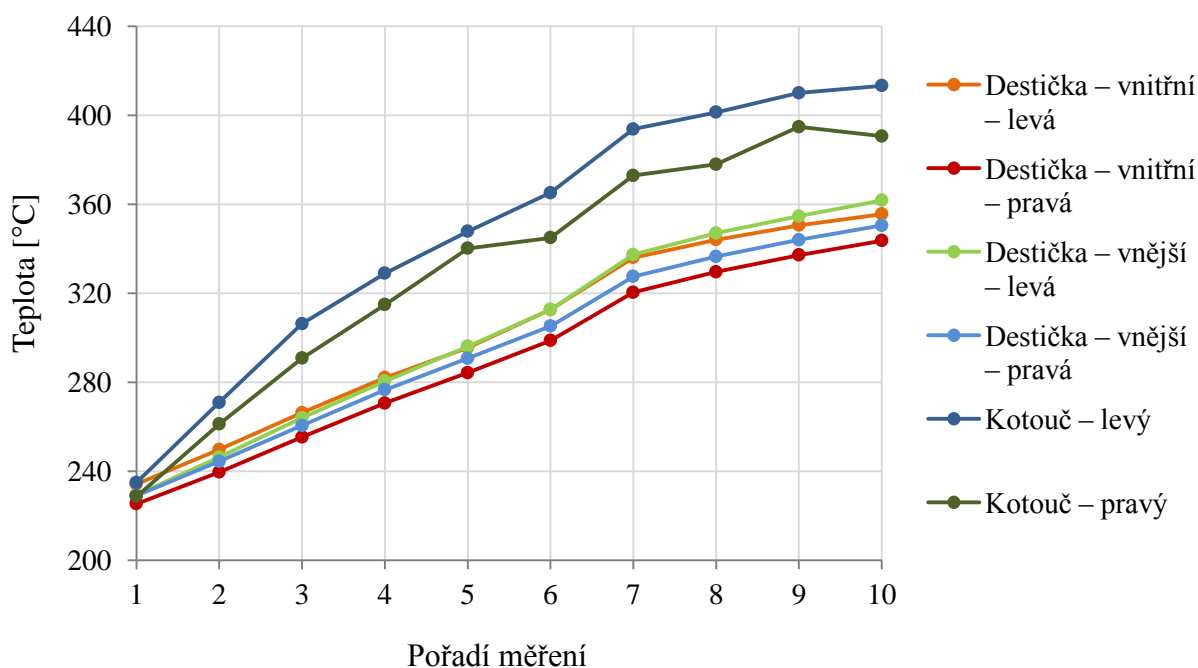
4.3.1 USTÁLENÍ MĚŘENÝCH HODNOT

Experiment začal s nezahřátými brzdami. Teplota brzd během jednotlivých měření narůstala, jelikož vozidlo po naměření jednoho testu nezastavovalo a celá skupina deseti měření byla provedena v jedné jízdě smyčce. Teplota předních brzd se tak začala ustalovat až ke konci testování. Po provedení měření sériového kanálu byla Octavie na čas odstavena kvůli přípravě

měření s kanálem prototypovým. Během této doby teplota brzd poklesla. Trvalo tedy opět nějakou dobu, než došlo k ustálení hodnot i při druhé sérii měření. Průběh teplot brzdového třmene předních brzd při všech deseti měřeních prototypového kanálu je zobrazen na Obr. 92. Na Obr. 93 je pak zobrazen průběh teplot brzdových destiček a kotouče. Zvláště na průběhu teplot třmene je dobře patrné postupné ustálení hodnot při posledních prováděných měřeních. Proto bylo dále pracováno pouze s hodnotami z posledních třech provedených měření každé série. Ustalování při využití sériového kanálu probíhalo rychleji.



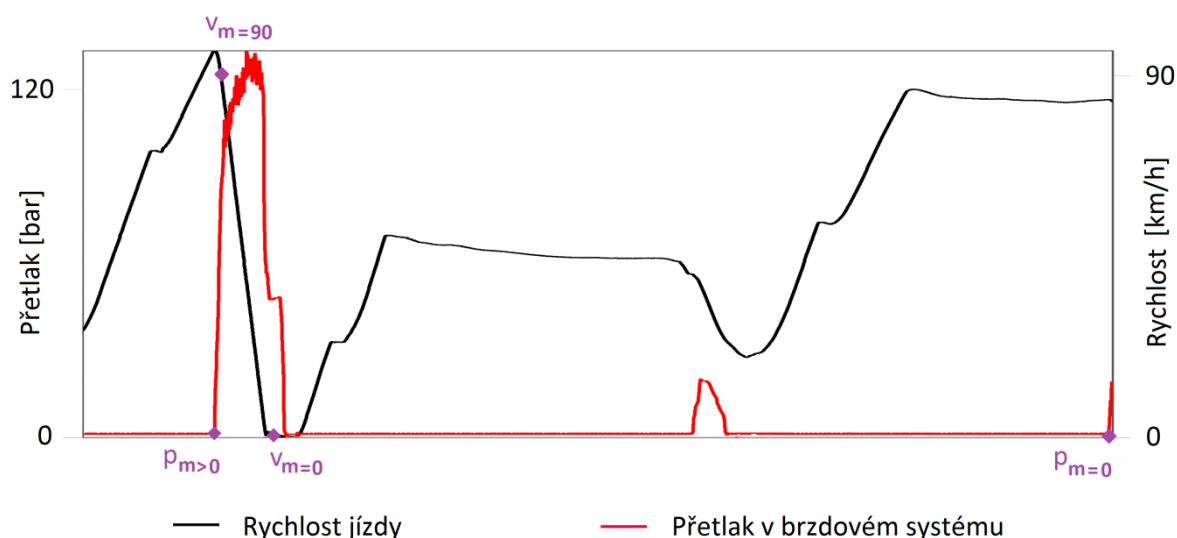
Obr. 92 Ustalování teplot třmene s narůstajícím počtem měření prototypového kanálu



Obr. 93 Ustalování teplot destiček a kotouče s narůstajícím počtem měření prototypového kanálu

4.3.2 CHARAKTERISTIKA JEDNOHO MĚŘENÉHO ÚSEKU

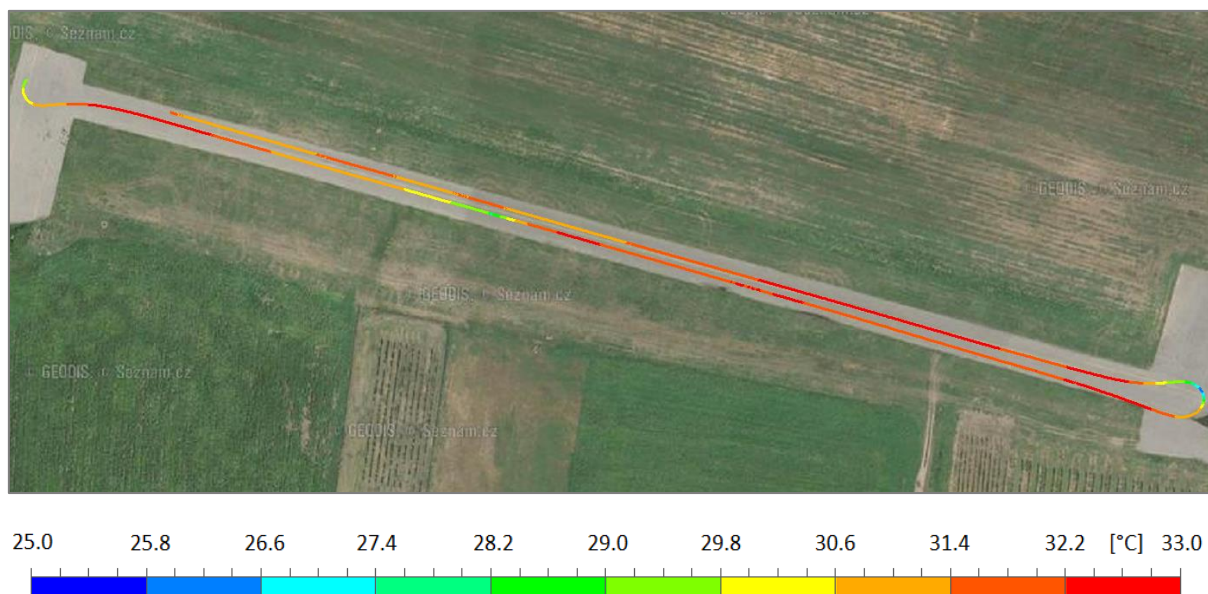
Průběh rychlosti vozu a přetlaku v brzdovém systému pro jedno provedené měření s prototypovým kanálem je zobrazen na Obr. 94. Vůz od začátku měření zrychloval až na rychlost překračující 90 km/h. Poté byl maximální silou sešlápnut brzdový pedál a vůz zpomalil do zastavení. Zpomalení vozu při brzdění dosahovalo hodnoty $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Brzdový výkon byl roven přibližně 132 kW a brzdná dráha byla dlouhá 39 metrů. Po zastavení se vůz opět rozjel na rychlost okolo 50 km/h, dojel na konec trati, otočil se a jel zpátky. Při otáčení byly využity brzdy a rychlost automobilu poklesla přibližně na 25 km/h. Po tomto manévru se vůz rozjel na rychlost 80 km/h kterou následně udržoval pomocí tempomatu a v tomto režimu dojel až na konec trati. Tento styl jízdy sloužil k dochlazování brzd. Trajektorie vozu při jednom měřeném testu je zobrazena na Obr. 95.



Obr. 94 Průběh rychlosti jízdy vozidla a přetlaku v brzdovém systému při jednom měření

Na obrázku Obr. 95, který zachycuje trajektorii vozu, je také zobrazen rozdíl teplot brzdového třmene v bodě 1 pravé a levé přední brzdy při posledním měření prototypového kanálu. Levá brzda byla ochlazována pomocí tohoto kanálu a pravá brzda pomocí kanálu sériového. Uvedené hodnoty udávají naměřený rozdíl teploty mezi jednotlivými brzdami, ovšem jak bylo zmíněno výše, levá brzda brzdila více, než ta pravá, a více se tak zahřívala. Vliv vytvořeného aktivního kanálu na snížení teploty brzdy je proto ještě větší. Tento obrázek tak slouží jen pro ilustraci vlivu rychlosti jízdy na rozdíl teplot předních brzd.

Automobil jel po pravé straně testovací dráhy. Žlutý úsek v polovině trati přecházející do zelena představuje brzdění automobilu a jeho následné zastavení. Při nízkých rychlostech se brzdy málo chladily, což mělo za následek postupné vyrovnávání tepot levého a pravého brzdového třmene. Po opětovném rozjezdu automobilu rozdíl teplot opět stoupl. Nejvíce rozdíl poklesl při otáčení automobilu v polovině měřeného úseku, což je způsobeno nízkou rychlostí jízdy, přibrzděním automobilu v zatáčce a také tím, že sériový kanál na pravé straně automobilu konal při otáčení delší dráhu a přivedl tak k brzdě větší množství vzduchu. Ihned po otočení automobilu byly rozdíly teplot opět nejvyšší, protože vůz zrychloval na rychlost 80 km/h. Při dochlazování se již rozdíl udržuje na podobných hodnotách v rozsahu $\pm 1,5$ stupně Celsia.



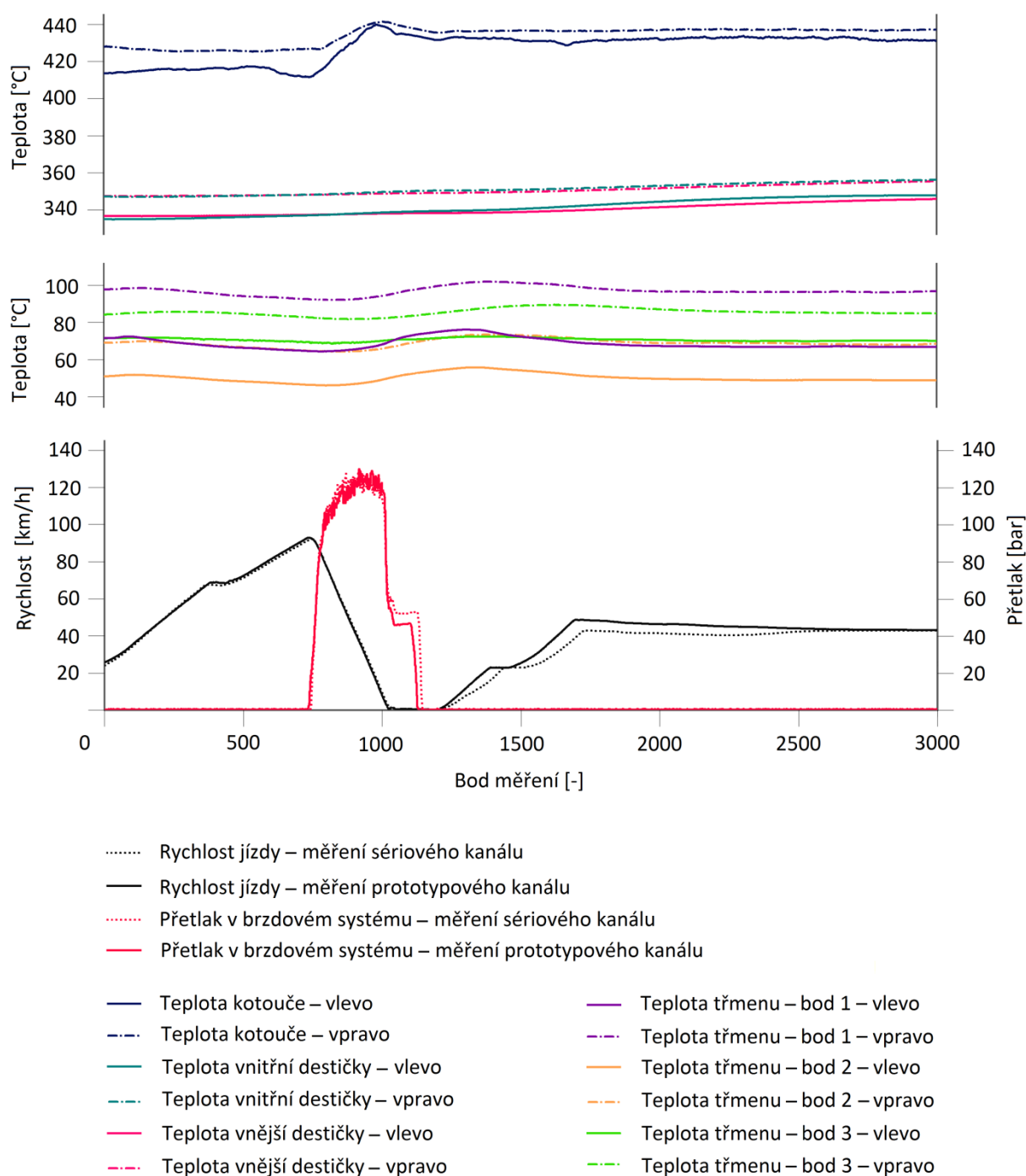
Obr. 95 Trajektorie vozu s vyznačenými hodnotami rozdílu teplot pravé a levé brzdy

4.3.3 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ PRŮBĚHU TEPLOT

Graf zobrazený na Obr. 96 znázorňuje průběh teplot pravé a levé brzdy v závislosti na čase při měření prototypového kanálu. Tvorba grafu probíhala následovně. Z každé skupiny deseti měření bylo zvoleno jedno měření tak, aby průběh rychlosti a brzdového přetlaku těchto dvou měření byl co nejpodobnější. Jelikož levé přední kolo brzdilo více než to pravé, byly dle průběhu naměřených teplot pro sériový kanál zkorigovány průběhy teplot naměřené na kanále prototypovém. Jednotlivé odchylky v průběhu rychlosti a přetlaku v brzdovém systému porovnávaných měření jsou v grafu zobrazeny také. Plnou čarou je vykreslena brzda využívající prototypový kanál a čerchovanou potom brzda, k níž je vzduch přiváděn sériovým kanálem. Vykresleno je prvních 3000 měřených bodů, tedy pouze necelá polovina jednoho měření.

Jelikož jsou hodnoty naměřených teplot závislé na teplotě brzd před zahájením měření a také na rychlosti jízdy, slouží tento graf především pro zobrazení průběhu teplot v závislosti na režimu jízdy a také pro představu o rozdílu teplot na brzdách při využití prototypového kanálu. Hodnoty rozdílů teplot jsou pouze orientační a přesné výsledky budou uvedeny níže.

Průběh teploty brzdového kotouče je velmi závislý na podmínkách experimentu a pro každé prováděné měření se lišil. Rozdíl teplot mezi pravým a levým kotoučem je v tomto grafu malý právě díky srovnání dvou měření s odlišnými vstupními podmínkami.



Obr. 96 Průběh teplot během měření prototypového kanálu

4.3.4 VYHODNOCENÍ ROZDÍLU TEPLIT

Účinnost chlazení byla vyhodnocena ve čtyřech bodech. Tyto body jsou zobrazeny na Obr. 94. Bod $p_{m>0}$ představuje počátek brzdění. Bod označený jako $v_{m=90}$ představuje okamžik, kdy rychlost vozidla po zahájení brzdění poklesla na hodnotu 90 km/h. Třetí bod $v_{m=0}$ označuje zastavení vozu a poslední bod $p_{m=0}$ představuje okamžik ukončení fáze dochlazování.

Jak již bylo zdůvodněno výše, při vyhodnocení účinnosti kanálu byly použity pouze data z posledních tří provedených měření sériového a prototypového kanálu.

ROZDÍL TEPLIT V BODĚ $P_{M>0}$

Hodnoty teplot, které jsou uvedeny v následujících třech tabulkách, se vztahují k bodu $p_{m>0}$.

V Tab. 1 jsou uvedeny naměřené hodnoty teplot brzdového třmene pravé i levé brzdy pro měření sériového i prototypového kanálu. V tabulce je uvedena také průměrná teplota všech tří měření. Zde je dobře patrný pokles teploty třmene při využití prototypového kanálu. Je vhodné připomenout, že prototypový kanál byl osazen na levé straně automobilu.

Typ kanálu	Pořadí měření	Třmen – bod 1		Třmen – bod 2		Třmen – bod 3	
		levý	pravý	levý	pravý	levý	pravý
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sériový	1.	80,7	81,4	53,4	59,5	72,4	59,3
	2.	83,4	83,4	54,4	60,5	74,0	60,2
	3.	83,8	85,5	54,8	61,6	74,8	61,2
	Průměr	82,7	83,4	54,2	60,6	73,8	60,2
Prototypový	1.	64,6	92,5	46,3	69,4	69,4	69,6
	2.	63,5	92,9	45,0	69,2	66,8	69,0
	3.	62,9	93,6	44,2	68,9	66,1	69,1
	Průměr	63,6	93,0	45,2	69,2	67,5	69,2

Tab. 1 Teploty třmene pro tři ustálená měření v bodě $p_{m>0}$

V Tab. 2 jsou uvedeny stejné veličiny jako v tabulce předcházející, ovšem pro brzdové destičky a kotouče. Z teplot naměřených pro sériový kanál je patrná nesouměrnost brzdných sil na pravém a levém kole.

Typ kanálu	Pořadí měření	Destička – vnitřní		Destička – vnější		Kotouč	
		levá	pravá	levá	pravá	levý	pravý
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sériový	1.	344,8	318,2	345,6	324,7	405,3	365,7
	2.	350,5	323,7	351,8	330,1	407,4	374,1
	3.	355,1	328,2	356,9	334,7	414,8	380,6
	Průměr	350,1	323,4	351,4	329,8	409,2	373,5
Prototypový	1.	337,9	321,2	337,5	327,8	411,9	394,4
	2.	344,8	330,1	346,4	336,1	410,4	400,5
	3.	351,0	337,5	354,0	343,4	420,9	403,0
	Průměr	344,3	329,6	346,0	335,7	414,4	399,3

Tab. 2 Teploty destiček a kotouče pro tři ustálená měření v bodě $p_{m>0}$

V Tab. 3 jsou uvedeny rozdíly teplot na levé a pravé brzdě ΔT pro oba typy měření. Záporná hodnota značí, že levá brzda měla nižší teplotu a naopak. Výsledný rozdíl teplot levé brzdy při

porovnání měření obou typů kanálů je označen jako ΔT_f . Tento rozdíl byl získán odečtením rozdílu teploty pravé a levé brzdy pro měření sériového kanálu od rozdílu teploty pravé a levé brzdy pro měření prototypového kanálu. Všechny hodnoty ΔT_f vycházejí záporně, což znamená, že při využití prototypového kanálu klesla teplota ve všech měřených bodech levé brzdy v porovnání s kanálem sériovým.

		Třmen			Destička		Kotouč
		<i>bod 1</i>	<i>bod 2</i>	<i>bod 3</i>	<i>vnitřní</i>	<i>vnější</i>	
$\Delta T - \text{sériový kanál}$	°C	-0,8	-6,4	13,5	26,8	21,6	35,7
$\Delta T - \text{prototypový kanál}$	°C	-29,4	-24,0	-1,8	14,7	10,2	15,1
ΔT_f	°C	-28,6	-17,7	-15,3	-12,1	-11,4	-20,5

Tab. 3 Hodnoty ΔT a ΔT_f v bodě $p_{m>0}$

ROZDÍL TEPLOT V BODĚ $v_{m=90}$

Následující tři tabulky se vztahují k bodu $v_{m=90}$. Obsah tabulek je stejný pro všechny čtyři body, ve kterých proběhlo vyhodnocení, mění se jen naměřené hodnoty teplot.

Tab. 4 zobrazuje teploty brzdového třmene pravé i levé brzdy pro měření sériového i prototypového kanálu a také průměrnou hodnotu těchto teplot. Jelikož je bod $v_{m=90}$ blízký bodu $p_{m>0}$, vycházejí naměřené hodnoty teplot obdobně.

Typ kanálu	Pořadí měření	Třmen – bod 1		Třmen – bod 2		Třmen – bod 3	
		<i>levý</i>	<i>pravý</i>	<i>levý</i>	<i>pravý</i>	<i>levý</i>	<i>pravý</i>
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sériový	1.	80,7	81,2	53,3	59,5	72,3	59,1
	2.	83,4	83,3	54,3	60,5	73,8	60,1
	3.	83,7	85,4	54,6	61,6	74,4	61,0
	<i>Průměr</i>	82,6	83,3	54,1	60,5	73,5	60,1
Prototypový	1.	64,4	92,3	46,0	69,2	69,0	69,3
	2.	63,2	92,7	44,8	69,0	66,7	68,8
	3.	62,8	93,4	44,0	68,7	66,3	68,8
	<i>Průměr</i>	63,5	92,8	45,0	69,0	67,3	69,0

Tab. 4 Teploty třmene pro tři ustálená měření v bodě $v_{m=90}$

Teploty obou brzdových destiček a kotouče naměřené v bodě $v_{m=90}$ jsou uvedeny v Tab. 5.

Typ kanálu	Pořadí měření	Destička – vnitřní		Destička – vnější		Kotouč	
		levá	pravá	levá	pravá	levý	pravý
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sériový	1.	344,8	318,3	345,5	324,7	404,1	366,0
	2.	350,4	323,6	351,7	330,1	407,5	374,2
	3.	355,1	328,3	356,9	334,8	414,4	381,3
	Průměr	350,1	323,4	351,4	329,8	408,7	373,8
Prototypový	1.	337,3	321,3	337,5	327,8	413,5	394,2
	2.	344,9	330,1	346,5	336,1	412,1	399,9
	3.	351,1	337,5	354,0	343,4	422,2	403,4
	Průměr	344,4	329,7	346,0	335,7	415,9	399,2

Tab. 5 Teploty destiček a kotouče pro tři ustálená měření v bodě $v_{m=90}$

Tab. 6 zobrazuje, o kolik klesla teplota brzdy při využití prototypového kanálu. Všechny hodnoty jsou opět záporné.

		Třmen			Destička		Kotouč
		bod 1	bod 2	bod 3	vnitřní	vnější	
ΔT – sériový kanál	°C	-0,7	-6,4	13,4	26,7	21,5	34,9
ΔT – prototypový kanál	°C	-29,3	-24,0	-1,7	14,8	10,3	16,7
ΔT_f	°C	-28,6	-17,6	-15,1	-11,9	-11,3	-18,2

Tab. 6 Hodnoty ΔT a ΔT_f v bodě $v_{m=90}$

ROZDÍL TEPLOT V BODĚ $v_{M=0}$

Následující tři tabulky se vztahují k bodu $v_{m=0}$.

Teploty brzdového třmene pravé i levé brzdy při měření sériového i prototypového kanálu v bodě $v_{m=0}$ jsou uvedeny v Tab. 7. V této tabulce jsou obsaženy také průměrné hodnoty těchto teplot.

Typ kanálu	Pořadí měření	Třmen – bod 1		Třmen – bod 2		Třmen – bod 3	
		levý	pravý	levý	pravý	levý	pravý
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sériový	1.	87,5	84,1	59,2	61,7	74,2	59,8
	2.	90,2	87,8	61,0	64,0	76,3	61,4
	3.	91,1	89,1	60,7	64,6	76,9	61,8
	Průměr	89,6	87,0	60,3	63,4	75,8	61,0
Prototypový	1.	71,0	95,8	50,8	72,1	70,7	69,7
	2.	70,0	96,4	49,5	72,0	68,8	69,5
	3.	69,8	97,5	49,0	71,9	67,9	69,2
	Průměr	70,3	96,5	49,8	72,0	69,1	69,4

Tab. 7 Teploty třmene pro tři ustálená měření v bodě $v_{m=0}$

Teploty brzdových destiček a kotouče jsou uvedeny v Tab. 8.

Typ kanálu	Pořadí měření	Destička - vnitřní		Destička - vnější		Kotouč	
		levá	pravá	levá	pravá	levý	pravý
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sériový	1.	345,6	319,4	345,9	325,2	421,4	383,6
	2.	351,4	324,9	352,1	330,5	427,7	389,7
	3.	356,2	329,6	357,2	335,3	429,2	398,2
	Průměr	351,1	324,7	351,7	330,3	426,1	390,5
Prototypový	1.	339,0	322,9	338,3	328,5	435,0	407,3
	2.	346,3	331,6	347,0	336,6	437,5	413,4
	3.	352,6	339,0	354,5	343,9	450,7	422,3
	Průměr	346,0	331,2	346,6	336,3	441,1	414,3

Tab. 8 Teploty destiček a kotouče pro tři ustálená měření v bodě $v_{m=0}$

Pokles teploty levé brzdy při využití prototypového kanálu je uveden v Tab. 9.

		Třmen			Destička		Kotouč
		bod 1	bod 2	bod 3	vnitřní	vnější	
ΔT – sériový kanál	°C	2,6	-3,1	14,8	26,4	21,4	35,6
ΔT – prototypový kanál	°C	-26,3	-22,3	-0,3	14,8	10,3	26,8
ΔT_f	°C	-28,9	-19,1	-15,2	-11,6	-11,2	-8,9

Tab. 9 Hodnoty ΔT a ΔT_f v bodě $v_{m=0}$

ROZDÍL TEPLOT V BODĚ $p_{m=0}$

Zde jsou uvedeny tři tabulky s rozdíly teplot vztahující se k poslednímu vyhodnocovanému bodu $p_{m=0}$.

Hodnoty teplot třmene jsou uvedeny v Tab. 10.

Typ kanálu	Pořadí měření	Třmen – bod 1		Třmen – bod 2		Třmen – bod 3	
		levý	pravý	levý	pravý	levý	pravý
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sériový	1.	89,1	83,3	57,8	60,8	74,3	58,4
	2.	90,8	85,8	58,4	61,8	75,5	59,0
	3.	92,6	87,2	59,6	62,5	76,7	60,0
	Průměr	90,8	85,4	58,6	61,7	75,5	59,1
Prototypový	1.	63,8	92,9	44,8	69,2	68,1	66,2
	2.	64,0	93,7	44,1	68,8	67,7	66,0
	3.	62,9	94,1	43,0	69,1	66,7	65,9
	Průměr	63,6	93,5	44,0	69,0	67,5	66,0

Tab. 10 Teploty třmene pro tři ustálená měření v bodě $p_{m=0}$

Tab. 11 obsahuje hodnoty teplot obou destiček a kotouče.

Typ kanálu	Pořadí měření	Destička - vnitřní		Destička - vnější		Kotouč	
		levá	pravá	levá	pravá	levý	pravý
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sériový	1.	349,8	323,6	352,5	331,1	394,5	363,2
	2.	354,7	328,4	357,8	335,9	401,2	370,3
	3.	359,0	333,8	363,1	341,2	407,8	371,9
	Průměr	354,5	328,6	357,8	336,1	401,2	368,5
Prototypový	1.	344,1	329,6	347,0	336,5	401,3	378,0
	2.	350,5	337,2	354,7	344,0	410,0	394,7
	3.	355,5	343,6	361,7	350,4	413,3	390,6
	Průměr	350,1	336,8	354,5	343,6	408,2	387,8

Tab. 11 Teploty destiček a kotouče pro tři ustálená měření v bodě $p_{m=0}$

Výsledný rozdíl teplot levé brzdy je uveden v Tab. 12.

		Třmen			Destička		Kotouč
		bod 1	bod 2	bod 3	vnitřní	vnější	
ΔT – sériový kanál	°C	5,4	-3,1	164	25,9	21,7	32,7
ΔT – prototypový kanál	°C	-30,0	-25,0	1,5	13,3	10,8	20,5
ΔT_f	°C	-35,4	-22,0	-14,9	-12,6	-10,9	-12,3

Tab. 12 Hodnoty ΔT a ΔT_f v bodě $p_{m=0}$

4.3.5 OCHLAZENÍ BRZDY VYUŽÍVAJÍCÍ NAVRŽENÝ KANÁL

Přehled změny teplot levé brzdy při využití prototypového brzdového kanálu ve všech čtyřech vyhodnocovaných bodech je uveden v Tab. 13. Všechny hodnoty uvedené tabulce jsou záporné, což znamená, že využití navrženého kanálu snižuje teplotu brzdy ve všech bodech.

Bod měření	Jednotka	Třmen			Destička		Kotouč
		bod 1	bod 2	bod 3	vnitřní	vnější	
$p_{m>0}$	°C	-28,6	-17,7	-15,3	-12,1	-11,4	-20,5
$v_{m=90}$	°C	-28,6	-17,6	-15,1	-11,9	-11,3	-18,2
$v_{m=0}$	°C	-28,9	-19,1	-15,2	-11,6	-11,2	-8,9
$p_{m=0}$	°C	-35,4	-22,0	-14,9	-12,6	-10,9	-12,3

Tab. 13 Snížení teplot brzdy při využití prototypového kanálu oproti kanálu sériovému

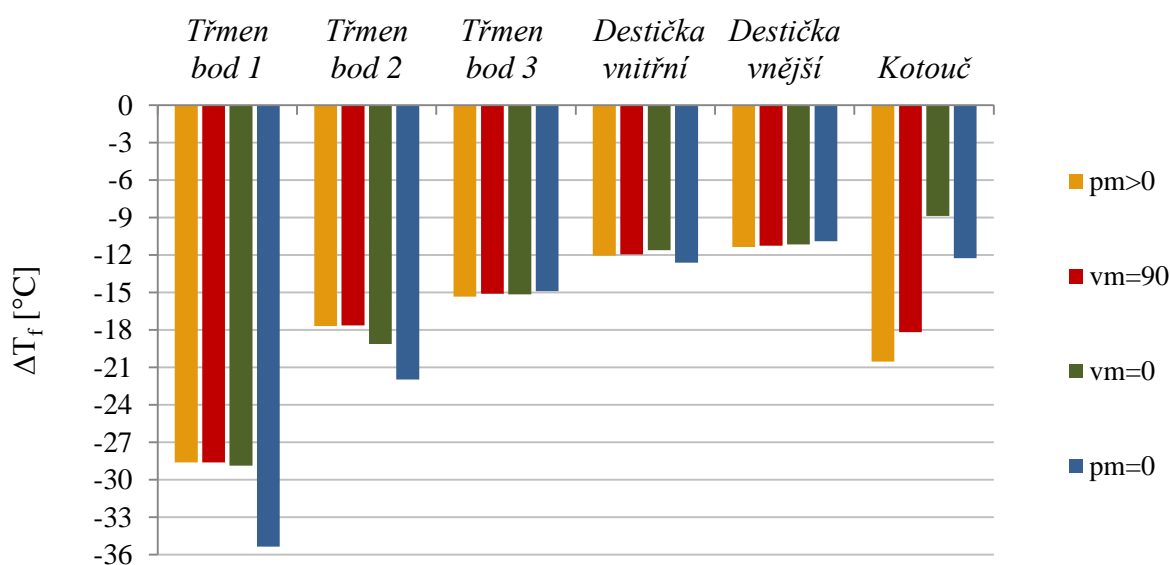
Hodnoty z výše uvedené tabulky jsou vykresleny pomocí sloupcového grafu na Obr. 97.

Z grafu vyplývá, že teplota nejvíce poklesla u brzdového třmene v bodě jedna a to až o více jak 35 °C na konci dochlazování. Tato hodnota odpovídá poklesu teploty o téměř 40 % ve srovnání se sériovým kanálem. Chlazení této části brzdy tak bylo nejefektivnější. Méně byl

třmen ochlazen v bodě dva a nejméně v bodě tři. To je způsobeno rozmístěním senzorů na třmeni, kdy bod jedna je nejbližší výstupního otvoru z kanálu a bod tři je nejdále.

Brzdové destičky se v rámci celé brzdy ochladily nejméně, jelikož jsou obklopeny třmenem a vzduch tak neproudí přímo k nim. Teplo z destiček je odváděno především prostřednictvím samotného třmene. Rozdíly teplot ve všech bodech vyhodnocení tak byly velmi podobné a pohybovaly se okolo hodnoty 12 °C u vnitřní destičky a 11 °C u vnější destičky.

Hodnota, o kterou klesla teplota kotouče, značně kolísala. Na začátku brzdění se pohybovala okolo 20 °C, ovšem na konci brzdění byl rozdíl mezi pravým a levým kotoučem pouze 9 °C. To je zapříčiněno tím, že samotný kotouč se z velké části chladí rotací při jízdě.



Obr. 97 Graf zobrazující snížení teploty brzdy při využití prototypového kanálu

Největší rozdíl ochlazení třmene v bodě jedna a dva byl při ukončení dochlazování. V bodě tři byla hodnota rozdílu velmi podobná pro všechny vyhodnocované okamžiky jízdy, stejně jako v případě brzdových destiček. Rozdíl v ochlazení kotouče značně kolísal v závislosti na aktuálním režimu jízdy a největší hodnoty dosahoval na počátku brzdění.

Nakonec je potřeba dodat, že vypočtené rozdíly vycházejí z odlišných okrajových teplot, protože s každým provedeným měřením narostla teplota brzd. Pro velmi přesné výsledky měření by bylo potřeba nechat brzdy zcela vychladnout před každým dalším měření, což by ale neúměrně prodlužovalo čas celého testování a měření by nebylo realizovatelné v jednom dni. K výpočtům byly ovšem využity pouze hodnoty z posledních tří realizovaných měření, kdy byly teploty brzd již téměř ustáleny. Proto lze považovat spočtené hodnoty poklesu teploty brzdy za dostatečné přesné.

O lepší chladicí účinnosti prototypového kanálu svědčí také fakt, že po provedení měření s tímto kanálem došlo po odstavení vozidla k přehřátí pravé brzdy, která byla ochlazována pomocí sériového kanálu.

4.3.6 RYCHLOST PROUDĚNÍ VZDUCHU V KANÁLECH

Naměřená data z termoanemometru pro čtyři vyhodnocované body jsou uvedena v Tab. 14. Hodnoty ukazují, že na začátku brzdění byla rychlost vzduchu v prototypovém kanále menší přibližně o 10 km/h. Tento výsledek může být vyvolán několika faktory. Průřez prototypového kanálu je větší, než průřez kanálu sériového, což zajišťuje větší hmotnostní tok vzduchu kanálem. Termoanemometr také měří jen v jednom bodě výstupního průřezu kanálu a pouze hodnotu rychlosti proudění ve směru kolmém na žhavený drát termoanemometru. Při umístění termoanemometru do jiného bodu by tak mohla být získána jiná rychlost proudění. Určitý vliv zde může sehrát také vítr. Právě díky větru byla naměřena nenulová rychlost proudění vzduchu kanálem při nulové rychlosti vozidla. Na konci dochlazování byla rychlost v prototypovém kanále větší o hodnotu 2,2 km/h.

<i>Bod měření</i>	<i>Sériový kanál</i>	<i>Prototypový kanál</i>	<i>Rozdíl</i>
	<i>m·s⁻¹</i>	<i>m·s⁻¹</i>	<i>m·s⁻¹</i>
$p_{m>0}$	31,19	28,24	-2,95
$v_{m=90}$	31,11	28,35	-2,76
$v_{m=0}$	0,71	1,69	0,98
$p_{m=0}$	22,67	23,28	0,62

Tab. 14 Rychlost proudění vzduch v kanálech

Tyto rozdíly v rychlosti proudění v obou kanálech jsou malé ve srovnání s maximálními dosaženými hodnotami. Je tedy možno říci, že rychlost proudění vzduchu v sériovém i navrženém prototypovém kanále je podobná.

5 AKTIVNÍ AERODYNAMICKÉ KŘÍDLO

Druhá část této diplomové práce se zaměřuje na automobilové křídlo. Úkolem bylo provést konstrukční návrh aero-aktivní regulace přítlaku na zadní nápravě vozidla.

Regulovanou veličinou je hodnota úhlu náběhu. Ta se mění v závislosti na režimu jízdy. Při přímé jízdě je požadován minimální aerodynamický odpor vozu. Křídlo bude ustaveno do polohy, při které redukuje vznik vírů za vozidlem a tím snižuje celkový aerodynamický odpor. Při průjezdu zatáčkou se křídlo naklopí tak, aby generovalo zápornou vztakovou sílu na zadní nápravě vozidla. A v případě brzdění bude křídlo maximálně naklopeno a využíváno jako aerodynamická brzda.

5.1 VOLBA PROFILU KŘÍDLA

Při vytváření konstrukčního návrhu křídla bylo nejprve nutno zvolit vhodný tvar profilu.

Vývoj profilů křídel probíhá již více jak sto let a za tuto dobu vznikly rozsáhlé databáze, které obsahují tisíce různých profilů. Proto bylo vhodné využít již vytvořený profil. Téměř všechny tyto profily jsou ovšem navrženy pro využití v leteckém průmyslu. Při volbě profilu pro automobilové křídlo muselo být zohledněno, že na letadlové křídlo jsou kladeny jiné požadavky. Letadlové křídlo je konstruováno pro vysoké hodnoty Reynoldsova čísla, tzn. pro vysoké rychlosti proudícího vzduchu. Letadlové křídlo se také nachází ve volném prostoru, kde neprobíhá interakce vzduchu proudícího kolem křídla s jinými částmi dopravního prostředku. Profil křídla pro Octavii musel být zvolen s přihlédnutím k těmto okolnostem.

Ve vědeckých knihovnách lze dohledat spoustu článků, které se zabývají konstrukčním návrhem zadního automobilového křídla a jeho vlivy na sportovní vozy s nekrytými koly. Ovšem kontakt proudícího vzduchu s odkrytými koly značně ovlivňuje proudění vzduchu kolem křídla a podmínky jsou zde odlišné od podmínek proudění vzduchu kolem uzavřené karosérie vozu. Tyto studie tak nelze použít jako vhodný podklad pro volbu profilu křídla pro automobil typu sedan. Studie zabývající se problematikou křídla u osobních automobilů většinou řeší jen problematiku vlivu přítomnosti křídla na aerodynamické parametry vozu, ovšem samotný konstrukční návrh křídla či volbu vhodného profilu již ne.

Roku 2011 provedla International Sports Engineering Association studii, jejímž cílem bylo pomocí výpočtu určit aerodynamické vlastnosti pěti vybraných profilů křídel při nízkých Reynoldsových číslech. Ze získaných výsledků vyplynulo, že profily s větším vyklenutím jsou výhodnější z hlediska příznivých hodnot generovaného vztaku a odporu. [51]

Další potřebné parametry pro návrh křídla byly získány z provedené rešerše vlivu tvaru profilu na aerodynamické vlastnosti křídla. Profil by neměl mít příliš nízkou hodnotu maximální tloušťky, jelikož u tenkých profilů může dojít k odtržení proudy vzduchu blízko náběžné hrany. Velká tloušťka profilu také není vhodná, jelikož u tlustších profilů dochází se zvětšujícím se úhlem náběhu k prudkému poklesu vztaku při dosažení maximální hodnoty vztaku. Dle Obr. 37 uvedeného v kapitole 1.6.3 je generována největší hodnota přítlaku, je-li tloušťka profilu rovna přibližně 12 % délky profilu křídla. Na základě těchto informací bylo rozhodnuto, že se tloušťka vybraného profilu bude pohybovat kolem této hodnoty s rozpětím pár jednotek procent.

Prvotní konstrukční návrh vhodného křídla pro konkrétní automobil je kvůli interakci křídla a karosérie téměř nemožný bez využití poznatků z již vytvořených a využívaných konstrukcí. Zásadní roli při výběru vhodného profilu křídla pro Octavii tedy sehrály informace získané při průzkumu automobilových křídel využívaných v motorsportu.

Při provádění průzkumu byly nejdříve vyhledány sériové modely automobilů, které mají velmi podobný boční profil karosérie jako Octavia třetí generace. U těchto vozů se předpokládá, že proudění vzduchu v oblasti okolo křídla bude obdobné. Důraz byl kladen hlavně na podobný tvar a sklon oblasti zadního skla, na tvar předního nárazníku a na úhel mezi kapotou a čelním sklem. Z této skupiny sériových automobilů byly vybrány vozy, které mají zastoupení v okruhových závodech vyšších kategorií, jakým je například Mistrovství světa cestovních vozů. U těchto závodních automobilů se neprovádí drastické úpravy v těch místech karosérie, na které byl průzkum zaměřen. Změny proudění vzduchu v zadní části karosérie jsou proto malé ve srovnání se sériovým modelem. Inspirace u profesionálních závodních vozů je založena na předpokladu, že vývoj automobilových křídel bude na nejvyšší úrovni právě v této oblasti.

Vybrány byly čtyři modely vozidel. Chevrolet RML Cruze TC1 2015, Mazda 3 Sedan 20B 2011, Mazda 6 Skyactiv D Race Car 2013 a Mercedes CLA 45 AMG Racing Series. Tyto vozy jsou zobrazeny na Obr. 98 a Obr. 99 v porovnání s Octavií.



Obr. 98 Škoda Octavia, Chevrolet Cruze, Mazda 3 Sedan [52][53][54]



Obr. 99 Mazda 6, Mercedes CLA 45 [55][56]

Křídla těchto vozů byla důkladně prostudována. Ukázalo se, že všechny využívají velmi podobný profil. Horní plocha křídla je vždy značně vyklenutá, nejvíce v blízkosti odtokové hrany. Vyklenutí spodní plochy křídla je pozvolnější. Náběžná hrana má ostrý profil. Celé křídlo je relativně tenké, obzvláště pak jeho zadní část.

Na Obr. 100 je patrná ostrá náběžná hrana křídla umístěného na vozu Chevrolet RML Cruze TC1. Také je zde dobře patrné vyklenutí křídla. Značně vyklenutého profilu využívá i zadní křídlo vozu Mercedes CLA 45 a Mazda 3 Sedan 20B, které jsou vyobrazeny na Obr. 101.



Obr. 100 Zadní křídlo – Chevrolet RML Cruze TC1 [57]

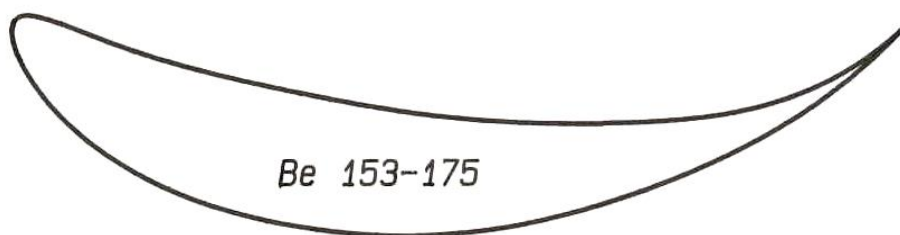


Obr. 101 Zadní křídlo – Mercedes CLA 45 AMG Racing Series a Mazda 3 Sedan 20B 2011 [58][59]

Přesný tvar profilu těchto závodních křidel je nemožné dohledat, jelikož data podléhají přísnému utajení. Bylo tedy potřeba dohledat profil, který bude odpovídat těmto znakům. V jedné z mnoha databází profilů křidel byla nalezena skupina profilů pod názvem Benzing, která svým tvarem odpovídá právě závodním profilům. Tuto skupinu navrhl Enrico Benzing speciálně pro automobilové aplikace. Dle autora se jedná o profily vypočtené podobnou, ovšem komplexnější metodou, než jakou využívá pro výpočet profilů NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Jedná se profily, které se hojně využívaly a stále využívají v mnoha odvětvích motorsportu. [60]

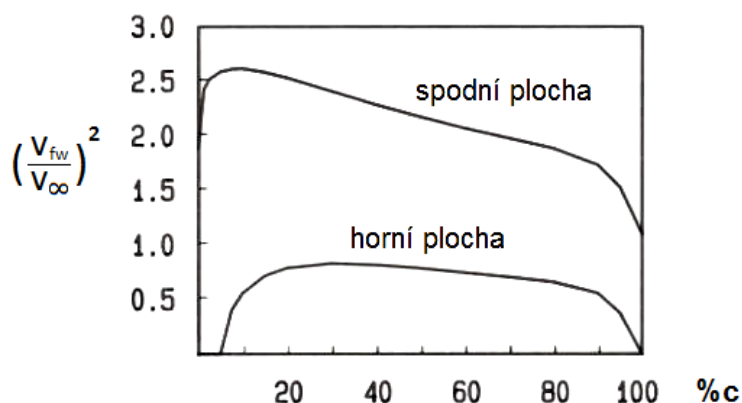
Profil automobilového křídla pro Škodu Octavii byl zvolen z této skupiny. Jedná se o profil s kódovým označením Be 153-175.

Označení udává parametry samotného profilu. První dvě číslice udávají tzv. relativní maximální tloušťku. Jedná se o maximální tloušťku profilu v procentech jeho délky. Třetí číslice označuje místo na vodorovné ose v desetinách délky profilu, ve kterém je tloušťka profilu maximální. Číslice za pomlčkou charakterizují maximální vyklenutí křídla a mají stejný význam jako v případě maximální tloušťky. Tvar profilu je zobrazen na Obr. 102.



Obr. 102 Profil Be 153-175 [60]

Na Obr. 103 je zobrazena hodnota druhé mocniny poměru v_{fw} vůči v_∞ v závislosti na procentech délky profilu Be 153-175 pro horní a spodní plochu křídla. Veličina v_{fw} představuje rychlost proudění vzduchu u povrchu křídla. Čím větší je plocha pod křivkou náležící spodní ploše křídla, tím větší je generovaný přítlak a naopak, čím větší je plocha pod křivkou horní plochy, tím je hodnota přítlaku nižší. Profil Be 153-175 generuje nejvyšší hodnotu přítlaku ve srovnání s ostatními profily série Benzing. [60]

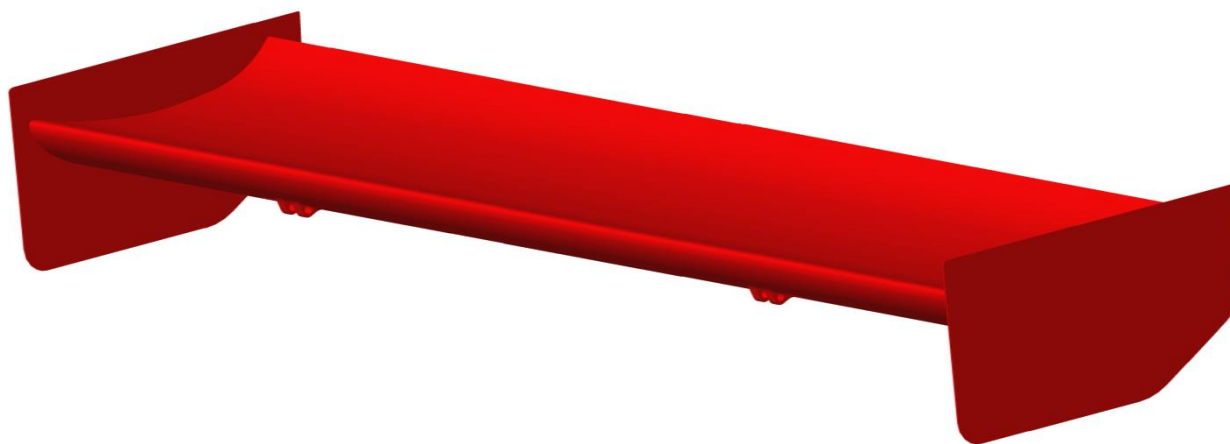


Obr. 103 Průběh rychlosti proudění nad a pod profilem Be 153-175 [60]

Také při návrhu tvaru bočnic křídla byla hledána inspirace u okruhových vozů. Tyto vozy využívají jednoduché bočnice tvořené rovinnou deskou různých tvarů. Velikost bočnic se u jednotlivých automobilů liší. Například Chevrolet Cruze využívá jednoduchého obdélníkového tvaru s velkou plochou, viz Obr. 100. Mazda 3 také využívá bočnici jednoduchého tvaru, ale její plocha je menší, jak je patrné z Obr. 101. Na tomto obrázku je také možno spatřit bočnici křídla vozu Mercedes CLA 45 AMG, která má již propracovanější tvar.

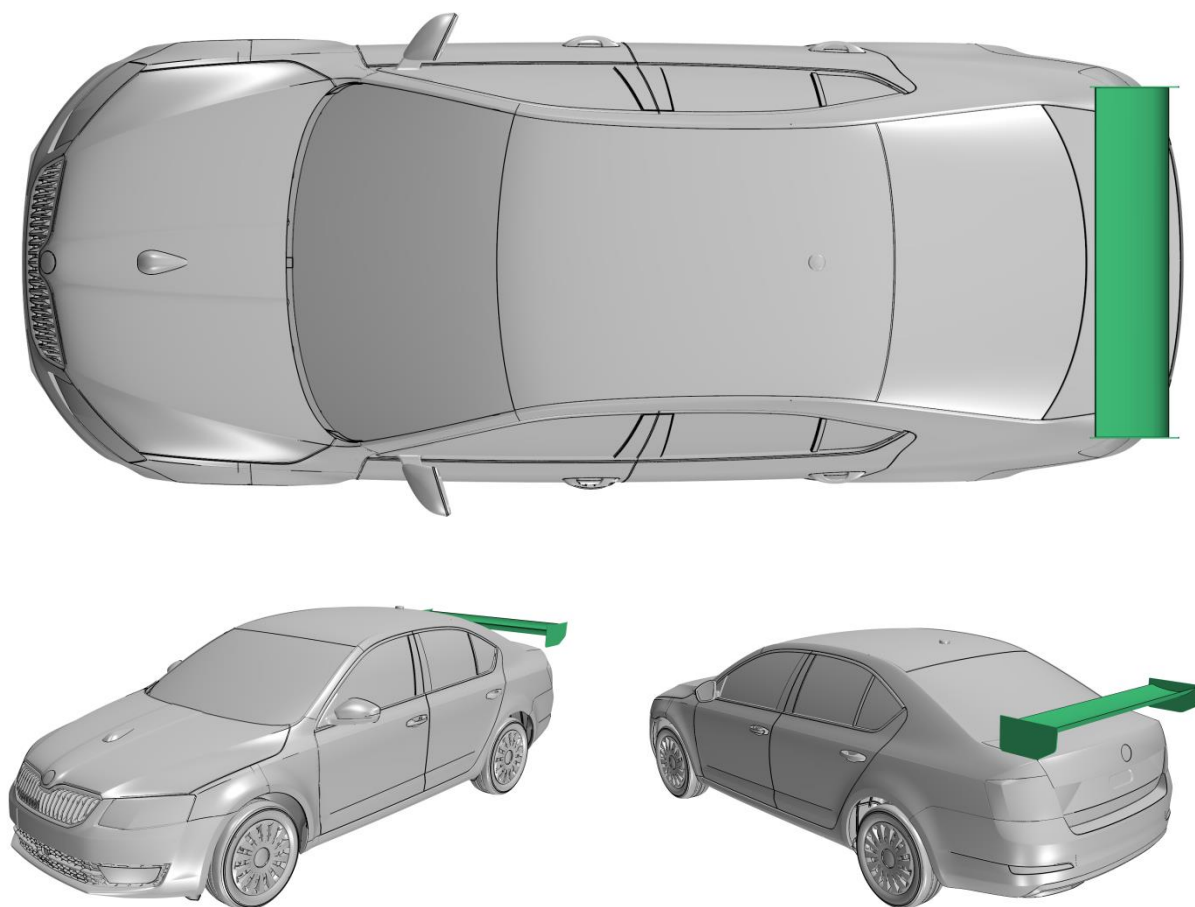
5.2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH KŘÍDLA

Křídlo tedy využívá profilu Benzing 153-175. CAD model zkonstruovaného křídla vytvořený v softwaru Creo 2.0 je zobrazen na Obr. 104.



Obr. 104 CAD model křídla

Délka profilu a rozpětí křídla byly voleny s ohledem na proporce zadní části automobilu, viz Obr. 105. Délka je rovna 1400 milimetrům, jelikož delší křídlo by již přesahovalo přes boky automobilu, což by mohlo negativně ovlivňovat proud vzduchu, který se pohybuje kolem bočních částí vozidla. Délka profilu odpovídá 300 milimetrům. Aspect ratio křídla s bočnicemi dosahuje hodnoty 5,806.



Obr. 105 Proporce křídla vůči automobilu

Tvar a velikost bočnic byly zvoleny úměrně k rozměrům samotného křídla. Dosahují výšky 180 milimetrů a šířky 350 milimetrů.

Na křídle jsou vymodelovány výstupky pro spojení křídla se stojnami a s ovládacím mechanismem. Součásti jsou propojeny pomocí válcových čepů. Spojení využívající čep poskytuje dostatečnou pevnost a přitom umožňuje vzájemný pohyb součástí. Čep spojující křídlo se stojnou má průměr 8 milimetrů, zatímco čep sloužící pro připojení ovládacího mechanismu dosahuje průměru 7,5 milimetrů. Osy čepů jsou od sebe vzdáleny 126 milimetrů.

Křídlo je podpíráno dvěma stojnami, což je nejběžněji využívaná konfigurace.

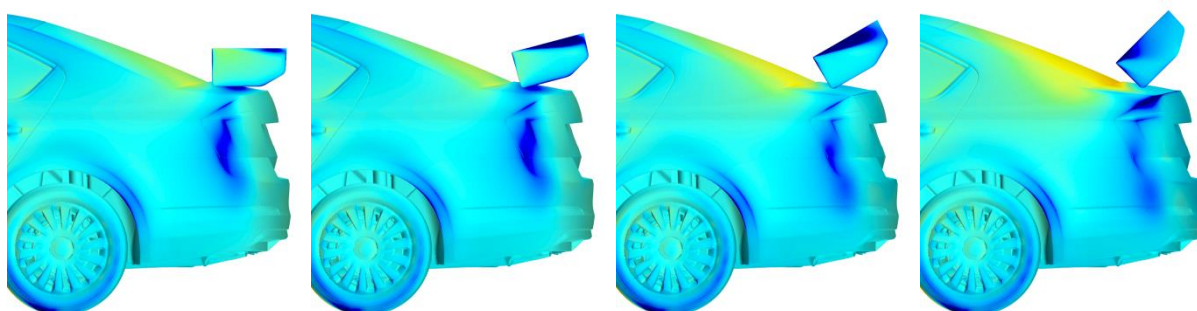
Samotné křídlo by mělo být vyrobeno jako skořepina z uhlíkových vláken. Uvnitř by bylo křídlo vyztuženo pomocí několika výztuh kopírujících profil křídla. Výstupky pro uchycení křídla by byly součástí těchto výztuh. Bočnice by byly vyrobeny zvlášť a následně připojeny ke křídlu.

5.3 VÝPOČET AERODYNAMICKÝCH PARAMETRŮ

Vytvořený model křídla byl předán k provedení CFD výpočtu, který byl realizován v softwaru STAR-CCM+ za podpory společnosti Škoda Auto a.s. Při této simulaci byly určeny

aerodynamické parametry křídla a také aerodynamické koeficienty vozu Škoda Octavia s osazeným křídlem.

Simulace byly provedeny pro čtyři různé hodnoty úhlu náběhu křídla. Křídlo v těchto čtyřech polohách je zobrazeno na Obr. 106. Vypočtena byla odporová síla D_w , vztlaková síla L_w a klonivý moment M_w , které působí na křídlo umístěné v rychlostním poli vozu. Tyto hodnoty jsou spočteny vzhledem k bodu otáčení křídla, který je určen souřadnicemi [3380, 0, 900] mm vzhledem k výchozímu souřadnicovému systému CAD sestavy celého vozu. Střed výchozího souřadnicového systému leží v rovině vozovky na úrovni středu přímky, která spojuje středy předních kol. Také byly spočteny aerodynamické koeficienty odporu, celkového vztlaku a vztlaku na přední a zadní nápravě pro automobil osazený křídlem.



Obr. 106 Jednotlivé polohy křídla při simulaci

Přehled vypočtených hodnot je uveden v Tab. 15. Hodnoty aerodynamických součinitelů jsou dle zvyklostí zaokrouhleny na tři desetinná místa.

Úhel náběhu	Odporová síla křídla	Vztlaková síla křídla	Klonivý moment křídla	Souč. odporu vozu	Souč. vztlaku vozu	Souč. vztlaku přední nápravy	Souč. vztlaku zadní nápravy	Čelní plocha vozu
α	D_w	L_w	M_w	C_D	C_L	C_{LF}	C_{LR}	A_c
°	N	N	N·m	-	-	-	-	m ²
0	17,50	-646,55	59,23	0,350	-0,286	0,102	-0,388	2,218
15	92,03	-682,31	49,69	0,387	-0,331	0,118	-0,449	2,224
30	202,37	-464,18	44,61	0,445	-0,368	0,116	-0,484	2,233
45	297,41	-285,99	45,48	0,498	-0,377	0,109	-0,485	2,242

Tab. 15 Vypočtené parametry křídla a automobilu osazeného křídlem

Pro porovnání jsou v Tab. 16 obsaženy hodnoty výše uvedených parametrů spočtené pro automobil osazený křídlem, ovšem bez zahrnutí samotného křídla.

Úhel náběhu	Součinitel odporu vozu	Součinitel vztlaku vozu	Součinitel vztlaku přední nápravy	Součinitel vztlaku zadní nápravy	Čelní plocha vozu
α	C_D	C_L	C_{LF}	C_{LR}	A_c
°	-	-	-	-	m^2
0	0,340	0,029	-0,003	0,032	2,216
15	0,342	0,000	-0,006	0,007	
30	0,349	-0,145	0,000	-0,145	
45	0,358	-0,243	-0,002	-0,241	

Tab. 16 Vliv křídla na parametry automobilu

Rychlost proudění vzduchu pro výpočet byla zvolena 140 kilometrů za hodinu. Hustota vzduchu odpovídala 1,225 kilogramům na metr krychlový.

Pro křídlo umístěné ve volném prostoru by bylo možné přibližně určit hodnoty odporové a vztlakové síly křídla pomocí analytických vztahů popsaných v kapitole 1.6.1. Jelikož je ale křídlo umístěno v blízkosti karosérie, je potřeba do výpočtu zahrnout také ovlivnění proudění vzduchu přítomností automobilu. Díky této interakci křídla a karosérie bývají výsledky sil generovaných na křídle získané pomocí simulačních softwarů značně odlišné od analytického výpočtu.

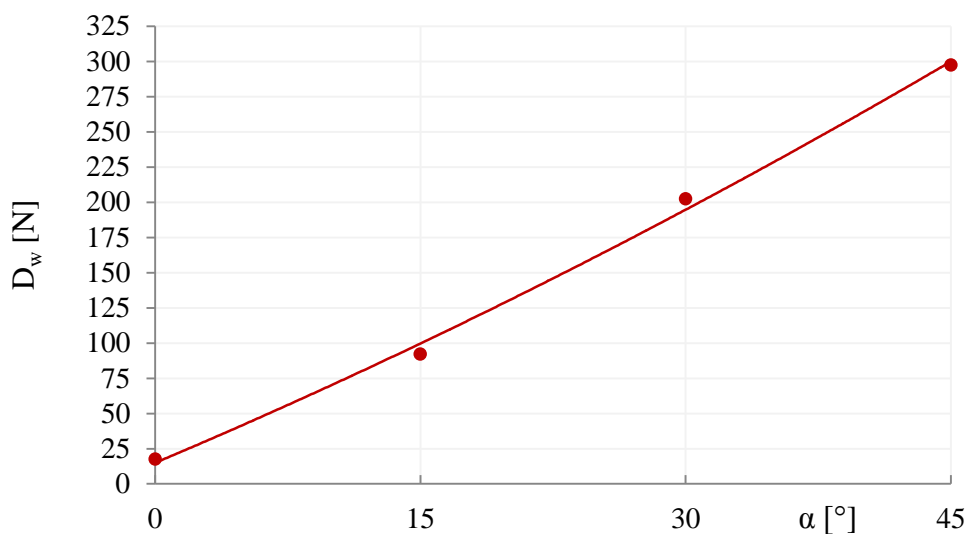
Výpočet vztlakové a odporové síly a klonivého momentu křídla v bodu otáčení sloužily jako podklad k následnému návrhu a pevnostnímu výpočtu stojen pro křídlo. Výpočet aerodynamických koeficientů byl proveden pro zjištění míry přínosu křídla. Také bylo vhodné znát průběh jednotlivých koeficientů pro zvolení vhodného úhlu náběhu pro jednotlivé režimy aktivní regulace zadního křídla.

Pro lepší představu vlivu úhlu náběhu na aerodynamické síly a koeficienty jsou níže uvedeny grafy spočtených závislostí. Aproximace vypočtených hodnot je provedena pomocí polynomu druhého stupně. U odporové a vztlakové síly křídla jsou vypočtené hodnoty vázány k volbě bodu pro výpočet.

5.3.1 AERODYNAMICKÉ SÍLY PŮSOBÍCÍ NA KŘÍDLO

ODPOROVÁ SÍLA

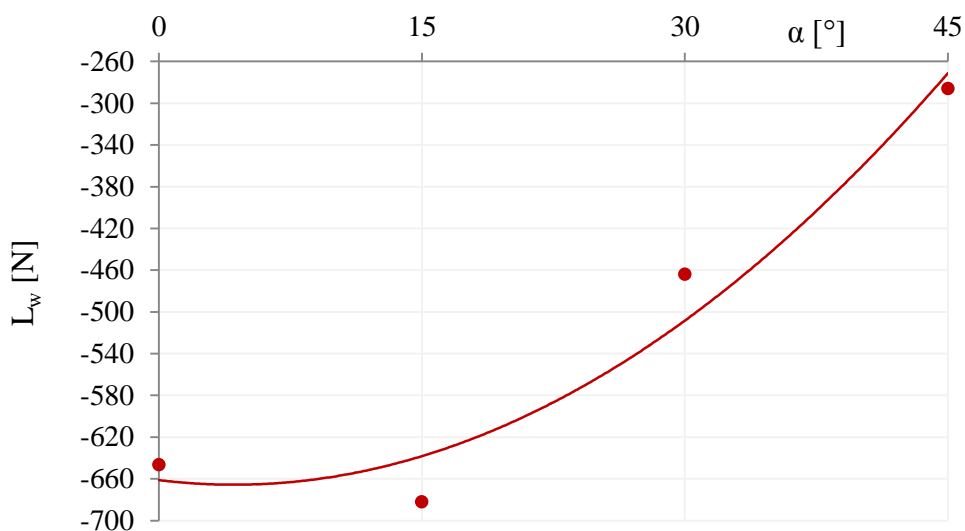
Na Obr. 107 je zobrazena závislost velikosti odporové síly křídla na úhlu náběhu. Z grafu je patrné, že odpor roste spolu s rostoucím úhlem náběhu. To je způsobeno tím, že při naklápění křídla roste velikost plochy, která je kolmá na směr proudění vzduchu. Změna úhlu náběhu má vliv také polohu bodu odtržení proudu vzduchu od křídla. Čím dříve k odtržení dojde, tím dříve vzniká úplav za křídlem, který generuje přídavný odpor. Díky změnám polohy náběžné hrany vůči směru proudění se mění i tloušťka mezní vrstvy, která má na hodnotu generovaného odporu také vliv. Tlustší mezní vrstva generuje větší hodnotu odporové síly.



Obr. 107 Graf závislosti odporové síly křídla na úhlu náběhu

VZTLAKOVÁ SÍLA

Průběh závislosti vztlakové síly působící na křídlo na úhlu náběhu je uveden na Obr. 108. Hodnota vztlaku je závislá především na vhodné poloze náběžné hrany křídla vůči vektoru rychlosti proudícího vzduchu. Také je vhodné, aby se bod odtržení nacházel co nejdále od náběžné hrany křídla. V tomto případě dosahuje záporný vztlak maximálních hodnot, pohybuje-li se naklopení křídla pod hodnotou 15 stupňů.

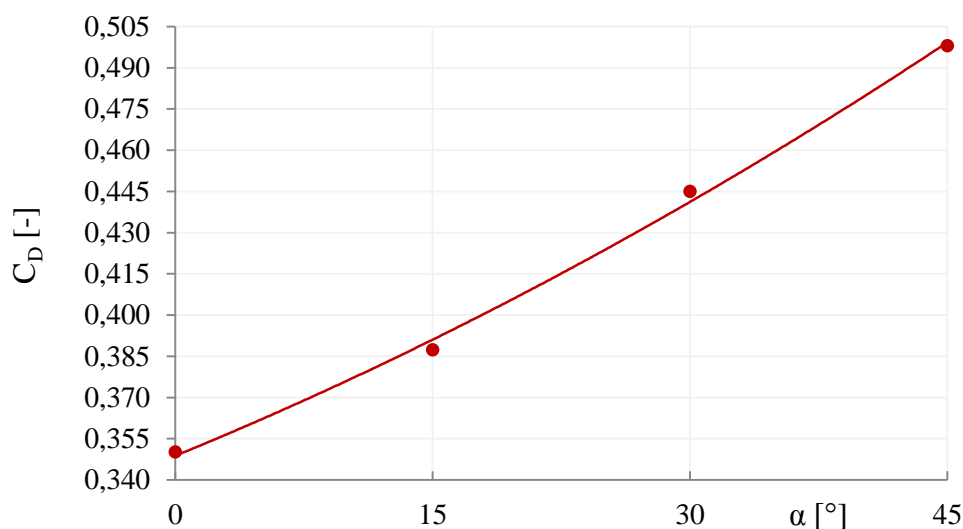


Obr. 108 Graf závislosti vztlakové síly křídla na úhlu náběhu

5.3.2 AERODYNAMICKÉ SOUČiniteLE VOZU OCTAVIA III S OSAZENÝM KŘÍDLEM

SOUČiniteL AERODYNAMICKÉHO ODPORU

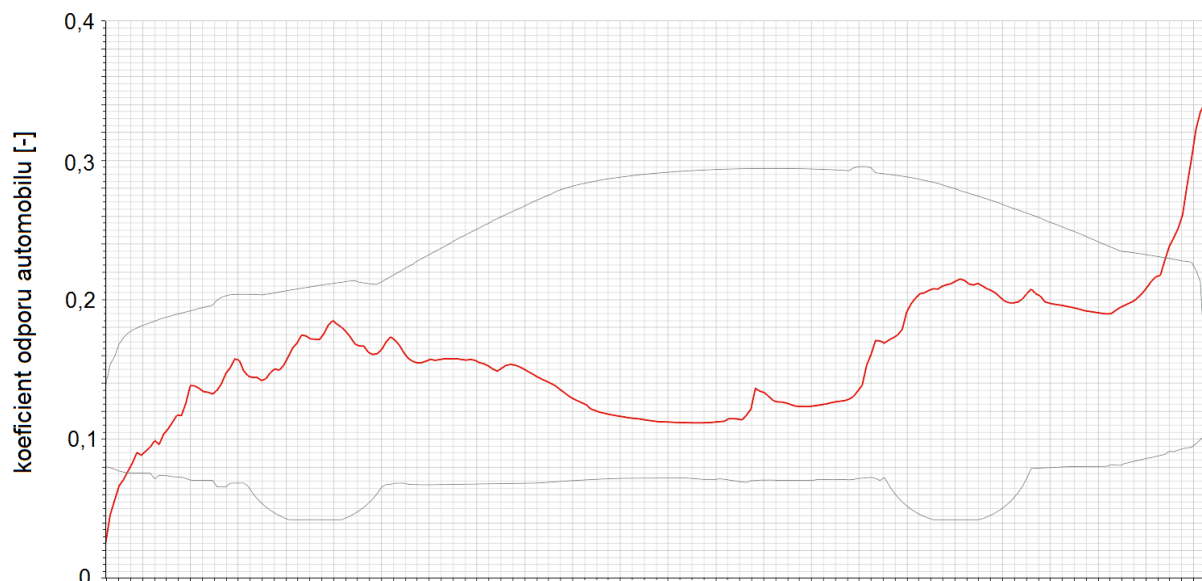
Součinitel aerodynamického odporu vozidla s křídlem roste dle očekávání s rostoucí hodnotou úhlu náběhu křídla, viz Obr. 109. Při naklopení křídla o 45 stupňů vzroste součinitel odporu automobilu o hodnotu 0,148 oproti křídlu sklopenému. To odpovídá nárůstu o 42 %. Tato hodnota generuje při maximálním naklopení křídla odporovou sílu, která pomáhá automobilu zkrátit brzdovou dráhu. Jelikož se aerodynamická odporová síla nepřenáší na vozovku, lze při brzdění dosáhnout vyšší hodnoty zpomalení, než je součin koeficientu tření a tíhy vozidla, tzn. lze dosáhnout brzdného zpomalení, které je vyšší než 1g.



Obr. 109 Graf závislosti součinitele odporu na úhlu náběhu u Octavie s křídlem

Katalogový list automobilu Škoda Octavia udává, že pro karosérii typu sedan se hodnoty součinitele odporu pohybují mezi hodnotou 0,277 a 0,312. Přesná hodnota závisí na typu motorizace a příplatkové výbavě. Průměrná hodnota součinitele odporu Octavie sedan je tedy po zaokrouhlení 0,295. Při simulaci byl využit model prototypového vozu, který má větší světlou výšku, než je průměrná hodnota světlé výšky u sériového vozu, proto je možno předpokládat, že součinitel odporu prototypového vozu bez křídla dosahoval ještě vyšších hodnot. Při srovnání průměrné hodnoty koeficientu odporu sériového automobilu s hodnotou vypočtenou pro automobil osazený křídlem při nulovém úhlu náběhu se ukazuje, že se koeficient zvýšil o 0,055 na hodnotu 0,350. Koeficient aerodynamického odporu se tak zvýšil přibližně o 19 %, což je u automobilu s křídlem očekávatelná hodnota. Tento nárůst je zapříčiněn faktem, že velká část aerodynamického odporu vozidla vzniká v úplavu a zadní křídlo značně narušuje proudění vzduchu právě v této oblasti. [61]

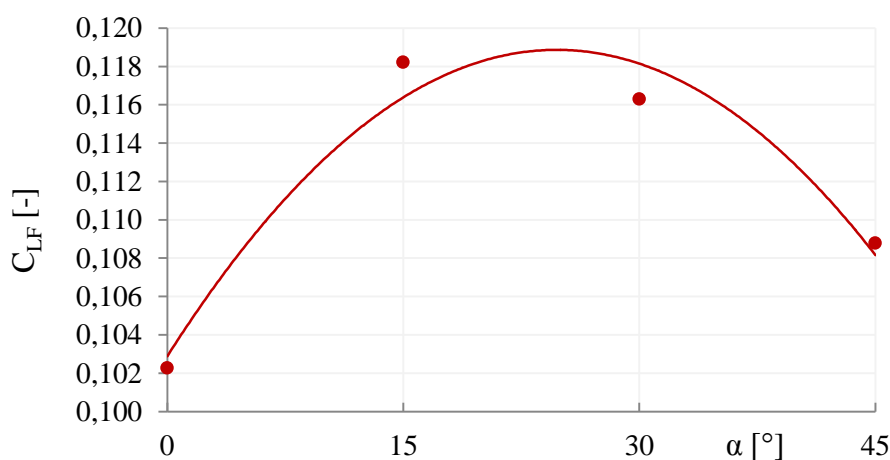
Nárůst koeficientu odporu v závislosti na vzdálenosti od přední části vozu je zobrazen na Obr. 110. Tento průběh je vykreslen pro úhel náběhu rovný 45 stupňům a byl získán z hodnot koeficientu odporu naměřených pro automobil, jehož aerodynamické parametry jsou ovlivněny přítomností křídla, ale samotné křídlo zde zahrnuto není. Tento obrázek dobře ilustruje vliv úplavu na hodnotu generovaného odporu. Křídlo narušuje proudění v zadní části vozu a rozšiřuje tak oblast úplavu za automobilem.



Obr. 110 Vývoj hodnoty koeficientu odporu po délce automobilu

SOUČINITEL AERODYNAMICKÉHO VZTLAKU PŘEDNÍ NÁPRAVY

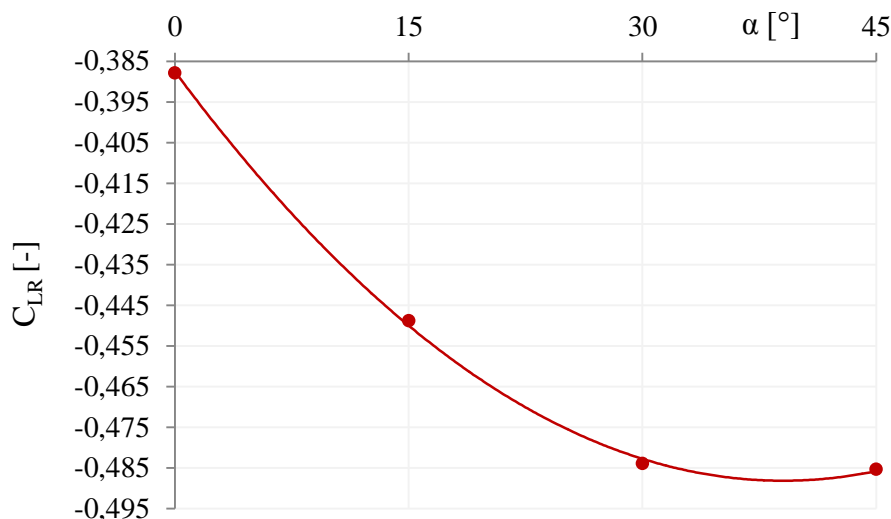
Hodnoty součinitele vztlaku vznikajícího na přední nápravě se v závislosti na poloze křídla mění pouze v řádu setin, viz Obr. 111. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že zadní křídlo má na vztlakovou sílu působící na přední nápravě zanedbatelný vliv.



Obr. 111 Graf závislosti součinitele vztlaku přední nápravy na úhlu náběhu u Octavie s křídlem

SOUČINITEL AERODYNAMICKÉHO VZTLAKU ZADNÍ NÁPRAVY

Na Obr. 112 je uvedena závislost součinitele vztlaku zadní nápravy na úhlu náběhu u Octavie osazené křídlem. Na rozdíl od průběhu vztlakové síly na křídle, klesá vztlaková síla na zadní nápravě automobilu téměř po celou dobu. Tento jev je způsoben vznikajícím klonivým momentem, který zvyšuje hodnotu přitlaku na zadní nápravě. Při vyklopení křídla o 45 stupňů klesne koeficient vztlaku na zadních kolech o hodnotu 0,097 ve srovnání s nulovým úhlem naklopení.



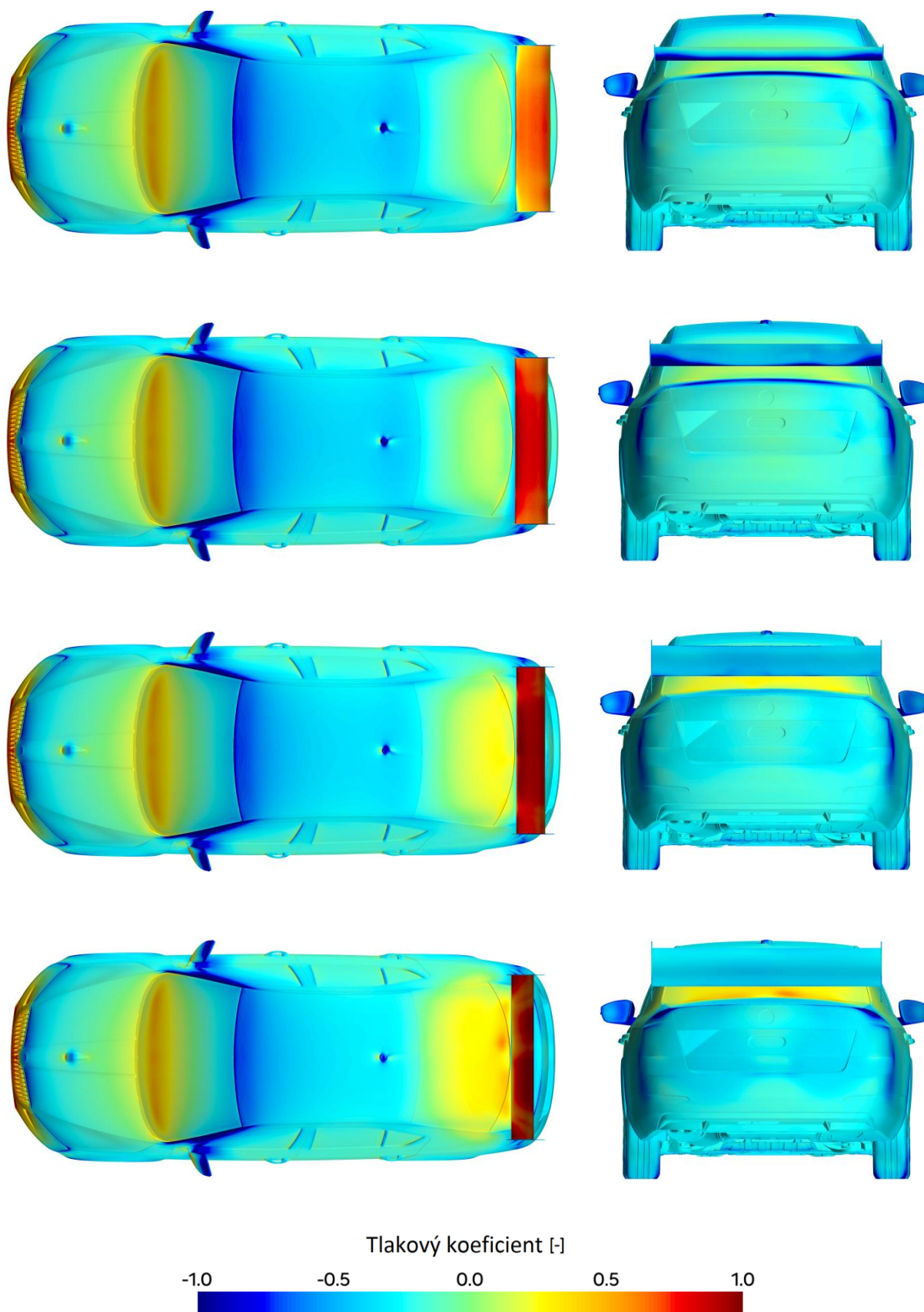
Obr. 112 Graf závislosti součinitele vztlaču zadní nápravy na úhlu náběhu u Octavie s křídlem

Tento parametr je důležitý jednak z hlediska zvýšení stability automobilu, ale také z hlediska zkrácení brzdné dráhy. Redukcí vztlačové síly na zadní nápravě je snižována pravděpodobnost, že dojde k odlehčení zadních kol natolik, aby pneumatiky ztratily přilnavost k vozovce. Přítlačná síla vznikající na zadních kolech při naklopení křídla o 45 stupňů také působí proti klonivému momentu, který vzniká při brzdění vlivem setrvačných sil. Tento moment zatěžuje přední nápravu vozidla a odlehčuje nápravu zadní, čímž snižuje velikost maximální přenositelné brzdné síly zadních pneumatik. Jelikož zablokování kol zadní nápravy vede k nestabilnímu chování vozidla, je při návrhu brzdového systému snahou, aby ke ztrátě přilnavosti došlo vždy nejdříve na nápravě přední. Proto je velikost brzdné síly zadních kol omezována. Při využití křídla je ovšem možno na zadních kolech brzdit větší silou bez rizika vzniku nestability a tím zkrátit brzdnou dráhu vozu.

Graf součinitele celkového vztlaču zde není uveden, jelikož se jedná pouze o součet hodnot koeficientu vztlaču na zadní a přední nápravě.

5.3.3 ROZLOŽENÍ TLAKU NA VOZE OCTAVIA III S OSAZENÝM KŘÍDLEM

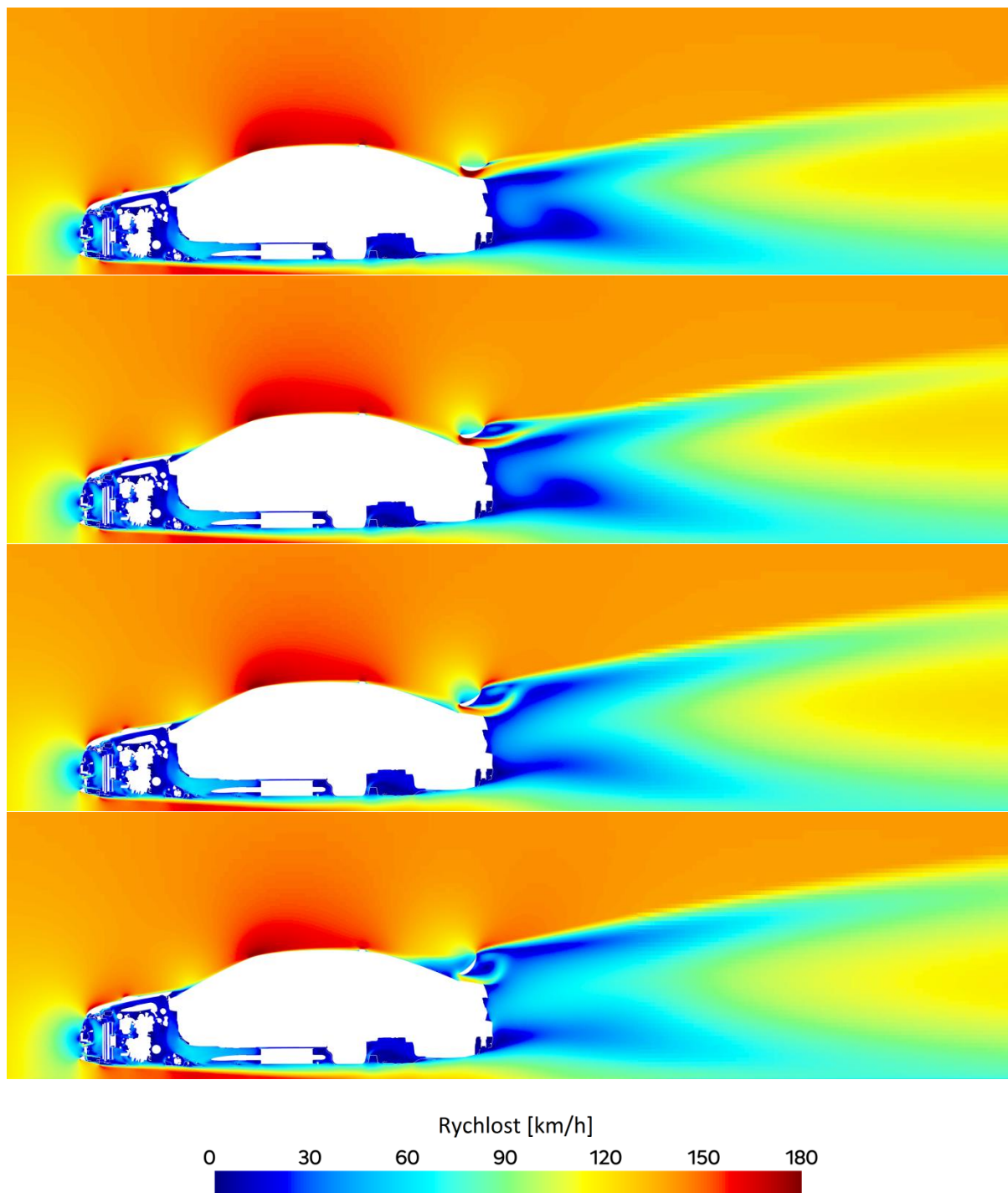
Na Obr. 113 je zobrazeno rozložení tlaku na automobilu pro čtyři vypočtené úhly náběhu křídla. Je zde patrný nárůst tlaku na křídle při jeho naklápění a také změna jeho čelní plochy. Při maximálním naklopení se začíná měnit rozložení tlaku na horním povrchu křídla. Tento jev je působen vznikajícími víry v této oblasti. S úhlem náběhu roste i tlak působící na karosérii v oblasti přechodu zadního skla a víka zavazadlového prostoru, který přitlačí zadní nápravu k vozovce.



Obr. 113 Rozložení tlaku na Octavii osazené křídlem

5.3.4 RYCHLOSTNÍ POLE VOZU OCTAVIA III S OSAZENÝM KŘÍDLEM

Na Obr. 114 je zobrazeno rychlostí pole vznikající kolem automobilu pro čtyři vypočtené úhly náběhu křídla. Z tohoto obrázku je patrné, že s rostoucím úhlem náběhu klesá rychlost proudění vzduchu po spodní ploše křídla. Při maximálním úhlu naklopení se vzduch odtrhává od spodní hrany křídla již u náběžné hrany a vytváří vířivé proudění. S rostoucí hodnotou naklopení křídla se také rozšiřuje oblast úplavu vznikajícího za vozidlem.



Obr. 114 Rychlostní pole kolem Octavie osazené křídlem

5.4 PŘEPOČET AERODYNAMICKÉHO ZATÍŽENÍ

Při CFD simulaci byl vyžit model Octavie s motorem 1.4 TSI. Proudění přes motorový prostor ovlivňuje rychlostí pole a tím i aerodynamické parametry vozu. Tyto parametry tak v závislosti na motorizaci vozu nabývají odlišných hodnot.

Simulace byla provedena při rychlosti proudění 140 kilometrů za hodinu. Ovšem daný model automobilu s motorem 1.4 TSI dosahuje maximální rychlosti 216 kilometrů za hodinu. Bylo proto nutno vypočtené hodnoty sil a momentu přepočítat pro tuto rychlost. Octavia s motorem 1.8 TSI okáže vyvinout rychlost až 229 kilometrů v hodině, ale jelikož by vypočtené aerodynamické zatížení pro tuto motorizaci vycházelo odlišně, bude dále počítáno s maximální rychlostí 216 km/h. Přepočtené hodnoty byly využity při návrhu ovládacího mechanismu a stojny pro křídlo, čímž bylo zajištěno, že celá sestava aktivního křídla bude správně pracovat v celém rozsahu provozních rychlostí automobilu. [64]

Pro přepočet byly využity rovnice pro aerodynamickou vztlakovou a odporovou sílu a klonivý moment, viz rovnice číslo 8, 10 a 12 v kapitole 1.2.1. Hustota vzduchu, čelní plocha a charakteristický rozměr automobilu jsou konstantní pro jednotlivé úhly náběhu ve všech rychlostech. Hodnota součinitele odporu se s rychlostí mění velmi málo a při výpočtu byla také považována za konstantu. Přepočtené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 17.

Úhel náběhu	α	$^\circ$	0	15	30	45
Odporová síla křídla	D_w	N	41,65	219,07	481,72	707,96
Vztlaková síla křídla	L_w	N	-1539,05	-1624,18	-1104,94	-680,77
Klonivý moment křídla	M_w	N·m	140,99	118,28	106,19	108,26

Tab. 17 Přepočtené hodnoty aerodynamického zatížení křídla pro rychlost proudění 216 km/h

5.5 OVLÁDACÍ MECHANISMUS

Úkolem ovládacího mechanismu je umožnit naklopení křídla. Křídlo je naklápěno kolem bodu otáčení, který byl využit pro výpočet aerodynamických parametrů. Návrh počítá s využitím takzvaných „push-pull“ kabelů, neboli kabelů, které dokáží přenášet tlak i tah. Jedná se o ovládací kabely, které se dokáží vysouvat a tím pohybovat s křídlem. Jakou hodnotu tlakové a tahové síly dokáže kabel přenést, závisí na hodnotě jeho průměru a také na vzdálenosti, o kterou se může vysunout. Proto jsou kabely nabízeny v několika modelových řadách. Pro volbu vhodného typu kabelu bylo potřeba nejdříve určit délku dráhy jeho pohybu a velikost sil, kterými bude zatěžován.

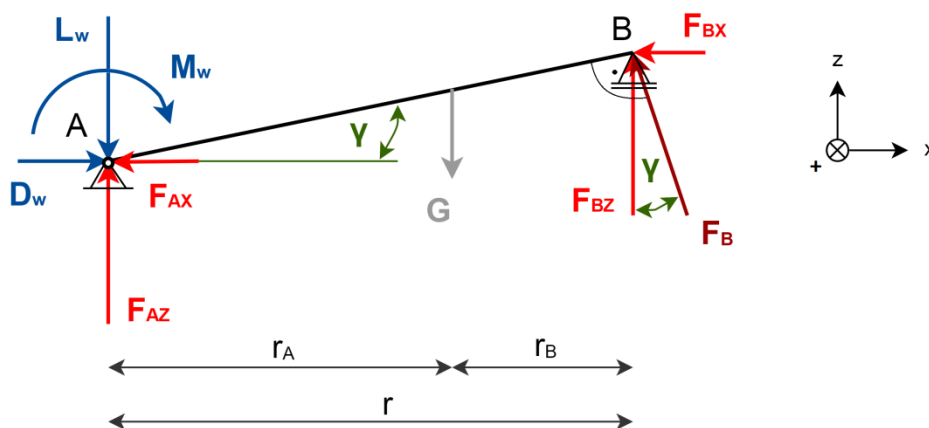
Vzdálenost mezi bodem otáčení křídla a bodem uchycení kabelu je rovna 126 milimetrům. Mechanismus musí být schopen naklopit křídlo o 45 stupňů. Z těchto údajů lze určit, že koncový bod kabelu pohybující se po kružnici urazí při maximálním naklopení dráhu necelých 99 milimetrů.

Pro určení maximálního zatížení ovládacího kabelu bylo potřeba vypočítat hodnoty sil působící na kabel v jednotlivých polohách naklopení křídla. Výpočet byl proveden analyticky pomocí vypočteného aerodynamického zatížení a hmotnosti křídla. Jelikož by bylo reálné

křídlo vyrobeno jako vyztužená skořepina z uhlíkových vláken, nebylo při návrhu možno přesně určit jeho reálnou hmotnost. Byla proto zvolena hmotnost 2,5 kilogramu, což je běžná hodnota, které dosahují automobilové křídla podobných rozměrů.

5.5.1 VÝPOČET ZATÍŽENÍ OVLÁDACÍHO MECHANISMU

Silový rozbor křídla pro výpočet zatížení lana je zobrazen na Obr. 115. Modře označené síly představují spočtené aerodynamické zatížení působící na křídlo, G je rovno tíhové síle křídla a červeně zaznačené síly představují reakce v uložení křídla. Bod A je rotační vazba spojující křídlo a stojnu. Bod B představuje spojení křídla s ovládacím mechanismem a je při výpočtu uvažován jako pevná podpora. Úhel γ charakterizuje sklon spojnice bodů A a B vůči ose x . Tento úhel není shodný s úhlem náběhu křídla, jelikož při nulové hodnotě úhlu náběhu není spojnice bodů A a B rovnoběžná s osou x . Proměnné r_A a r_B představují vzdálenost těžiště křídla od bodů A a B v ose x , zatímco proměnná r představuje vzdálenost těchto bodů.



Obr. 115 Silový rozbor křídla

Při výpočtu reakčních sil v bodě B byly využity následující rovnice:

$$F_{Bx} = \frac{M_w}{r} \cdot \sin \gamma + G \cdot \frac{r_A}{r} \cdot \sin \gamma, \quad (30)$$

$$F_{Bz} = \frac{M_w}{r} \cdot \cos \gamma + G \cdot \frac{r_A}{r} + G \cdot \frac{r_A}{r} \cdot \cos \gamma. \quad (31)$$

Hodnoty proměnných parametrů, které byly využity při výpočtu, jsou uvedeny v Tab. 18.

Úhel náběhu	α	°	0	15	30	45
Sklon spojnice bodů A a B	γ	°	7	8	23	38
Vzdálenost těžiště od bodu A	r_A	mm	78,0	77,9	71,8	17,5
Vzdálenost těžiště od bodu B	r_B	mm	47,0	47,9	44,2	3,78
Vzdálenost bodů A a B	r	mm	125,0	124,8	116,0	99,3

Tab. 18 Hodnoty proměnných parametrů pro výpočet reakčních sil

V tabulce Tab. 19 jsou uvedeny vypočtené hodnoty reakčních sil v bodě *B*, tedy v místě spojení křídla s ovládacím mechanismem.

Úhel náběhu	α	°	0	15	30	45
Hodnoty reakční síly v bodě <i>B</i> – osa <i>x</i>	F_{BX}	N	44,46	37,46	36,19	42,99
Hodnoty reakční síly v bodě <i>B</i> – osa <i>z</i>	F_{BZ}	N	1158,27	978,26	945,68	1120,37
Hodnoty celkové reakční síly v bodě <i>B</i>	F_B	N	1159,12	978,97	946,37	1121,20

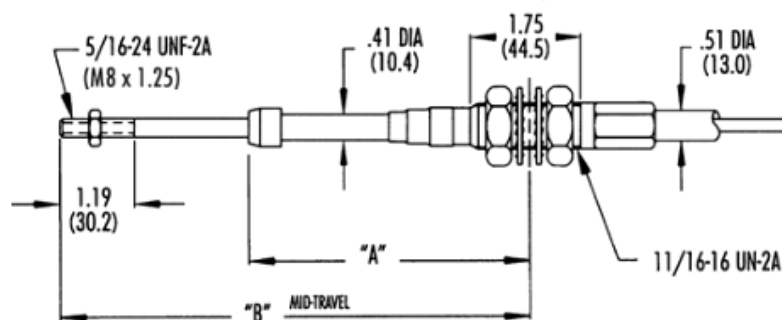
Tab. 19 Vypočtené hodnoty reakčních sil v bodě *B*

Kabel je namáhán pouze silovou složkou působící ve směru jeho osy. Silová složka působící kolmo k ose kabelu je zachycena čepem spojující křídlo a ovládací mechanismus. Kabel je již při nulovém úhlu náběhu křídla sklopen v rovině *xz* vůči ose *z* přibližně o 5,5 stupně a se zvětšujícím se úhlem náběhu se zvětšuje i velikost tohoto odklonu. Pro určení maximálního zatížení působícího na kabel je tedy potřeba brát zřetel nejenom na složku vypočtené síly působící v ose *z*, ale také na složku působící v ose *x*. Jelikož v tomto případě není kladen důraz na přesné hodnoty síly působící v kabelu ale spíše na jejich možné maximum, byl zdlouhavý přepočet hodnot síly působící v ose kabelu ve všech čtyřech polohách vynechán. Při určení maximální hodnoty síly byly využity hodnoty celkové síly působící v upevnění kabelu. Maximální hodnota této síly dosahuje po zaokrouhlení 1160 N. Jelikož pro naklápění křídla budou využity kabely dva, musí vybraný typ kabelu přenést minimálně 580 N.

5.5.2 VOLBA OVLÁDACÍHO KABELU

Bylo tedy spočteno, že kabel musí urazit dráhu minimálně 99 milimetrů a přenést minimální sílu 580 N v tlaku. Dle těchto údajů byl zvolen kabel 6 Series 4". Tento kabel se může vysunout o 4 palce, tedy o 101,6 mm a v tlaku přeneše 756 N. Mírné naddimenzování síly je vhodné s ohledem na možné působení větru na křídlo při jízdě. [62]

Rozměry kabelů Série 6 jsou uvedeny na Obr. 116. Hodnoty v závorkách jsou udány v milimetrech, ostatní jsou v palcích.



Obr. 116 Rozměry push-pull kabelu řady 6 [62]

Pro zvolený typ kabelu je rozměr *A* roven 158,8 milimetrům a rozměr *B* nabývá 241,3 milimetrů. Hodnota *B* platí pro kabel vysunutý do poloviny svojí maximální dráhy. [62]

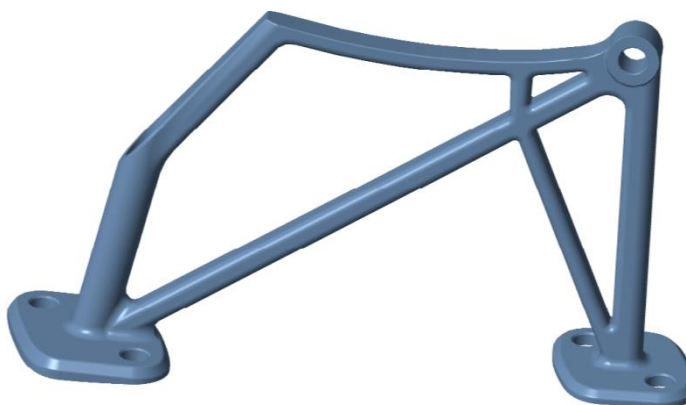
Pracovní konec kabelu, zakončený závitem M8x1,25, je zašroubován do vymodelované spojovací součásti, jejíž dvě oka jsou pomocí čepu propojena s výstupkem na křídle, viz Obr. 124.

Kabel prochází přes zadní podporu stojny křídla, která je kvůli tomuto účelu dutá. Pro montáž tělesa kabelu na správné místo je určen závit 11/16-16 UNF-2A. Původní návrh konstrukce počítal s našroubováním tělesa kabelu do duté části stojny, ale jak se ukázalo, tak těleso je příliš dlouhé a upevňovací závit leží až v oblasti mimo stojnu, tedy pod povrchem víka zavazadlového prostoru. Těleso kabelu tak prochází přes víko zavazadlového prostoru do samotného zavazadlového prostoru, kde je upevněno pomocí vymodelované objímky. Zásah konstrukce do zavazadlového prostoru je u prototypového návrhu akceptovatelný. Ostatně při využití sériových push-pull kabelů nebylo možno navrhnout konstrukci bez zásahu do prostoru pro zavazadla. V zavazadlovém prostoru by se také měly nacházet dva lineární elektromotory, které budou vytvářet dostatečnou sílu pro pohon kabelů.

5.6 NÁVRH STOJNY

Úkolem stojny je zachytit síly působící na křídlo a v případě aktivně regulovatelného křídla také umožnit jeho naklopení. Model stojny pro Octavii byl vytvořen v programu Creo 2.0. Jako podklad pro návrh byl využit CAD model víka zavazadlového prostoru poskytnutý společností Škoda Auto a.s.

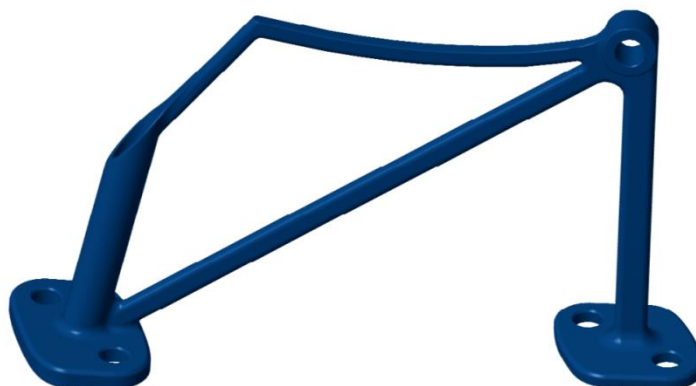
Prvotní návrh tvaru stojny je zobrazen na Obr. 117. Celá konstrukce je tvořena z několika vhodně pospojovaných prutů, které byly navrženy s ohledem na velikost a směr působících aerodynamických sil. Stojna je upevněna k víku zavazadlového prostoru na dvou místech pomocí čtyř šroubů o průměru 8 milimetrů. Kontakt mezi stojnou a víkem je rozložen do větší plochy kvůli působení křídlem generované přítláčné síly.



Obr. 117 Prvotní návrh stojny

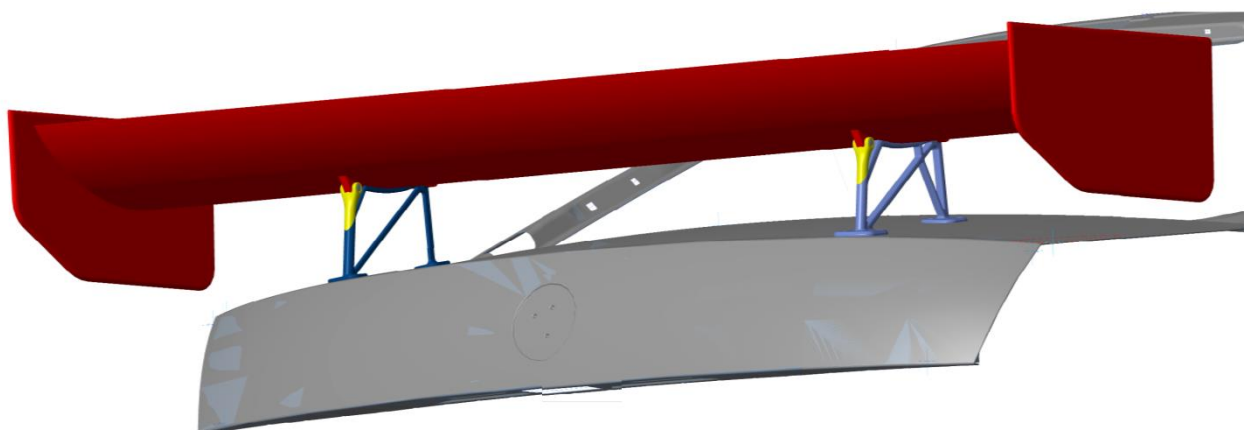
Jelikož navržená stojna měla být co nejlehčí, ale zároveň musela poskytovat potřebnou pevnost, byl tento model následně optimalizován dle působícího zatížení. K tomuto účelu byl využit software ANSYS Workbench. Bylo odzkoušeno několik různých konstrukčních návrhů a dle vypočtených hodnot napětí byla zvolena konečná verze stojny.

Finální model stojny je zobrazen na Obr. 118. Oproti prvotnímu návrhu byly odstraněny pruty, které přenášely pouze velmi malou hodnou zatížení a představovaly tak pouze zbytečné navýšení hmotnosti. U zbylých prutů byla zredukována jejich tloušťka.



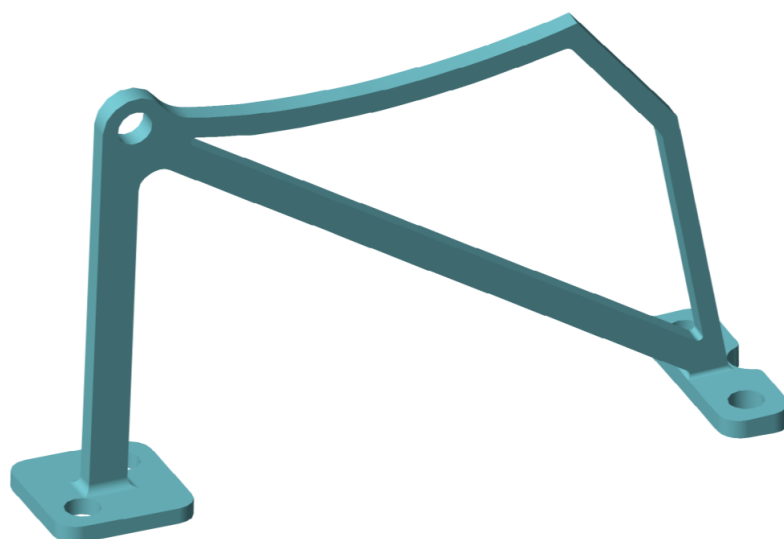
Obr. 118 Finální návrh stojny

Prvotní návrh byl vytvořen především s ohledem na vzhled celé sestavy zadního křídla. Po redukci konstrukce kvůli snížení hmotnosti již působí stojna značně subtilnějším dojmem, stejně jako celá sestava zadního křídla, viz Obr. 119.



Obr. 119 Sestava křídla s prvotním a finálním návrhem stojny

Výroba navržené stojny by byla ekonomicky náročnější, jelikož by ji bylo nutné odlít. Proto v případě, že by mělo být křídlo vyrobeno pro potřeby testování, by bylo vhodné vytvořit stojnu pomocí jiné, méně nákladné technologie. Nejlepším řešením je využít plát materiálu shodné tloušťky, jakou má navržená stojna a z něj vyříznout příslušný profil. Plochy, ve kterých se stojna stýká s víkem zavazadlového prostoru, by byly také vyříznuty a následně přivařeny ke stojně. Na Obr. 120 je ukázáno, jak by prototypová stojna mohla vypadat. Jelikož by tato stojna měla stejnou tloušťku a také profil jako navržená stojna, bylo by rozložení napětí v součásti velmi podobné.



Obr. 120 Stojná vytvořená z plátu

Při výrobě testovacího prototypu by také nebyla využita vymodelovaná součást spojující kabel a křídlo, ale zakoupilo by se oko vhodných parametrů, které je určeno přímo pro push-pull kabel.

5.6.1 KONTROLA STOJNY

Jak již bylo zmíněno výše, výpočet napětí vznikajícího ve stojně vlivem působení aerodynamických sil byl proveden pomocí programu ANSYS Workbench.

Hodnoty síly zatěžující stojnu v bodě otáčení křídla byly určeny pomocí analytického výpočtu, stejně jako hodnoty síly zatěžující ovládací kabel. Z výše uvedeného Obr. 115 vyplývají následující závislosti:

$$F_{AX} = D_w, \quad (32)$$

$$F_{AZ} = |L_w| + G \cdot \frac{r_B}{r}. \quad (33)$$

Pro výpočet byly opět využity hodnoty proměnných, které jsou uvedeny v Tab. 18.

Vypočtené hodnoty reakčních sil v bodě otáčení křídla, tedy v bodě A, jsou uvedeny v Tab. 20. Tyto hodnoty podělené dvěma byly použity při pevnostní analýze stojny.

Úhel náběhu	α	°	0	15	30	45
Hodnoty reakční síly v bodě A – osa x	F_{AX}	N	41,66	219,07	481,73	707,96
Hodnoty reakční síly v bodě A – osa z	F_{AZ}	N	1548,45	1633,57	1114,46	690,29

Tab. 20 Vypočtené hodnoty reakčních sil v bodě A

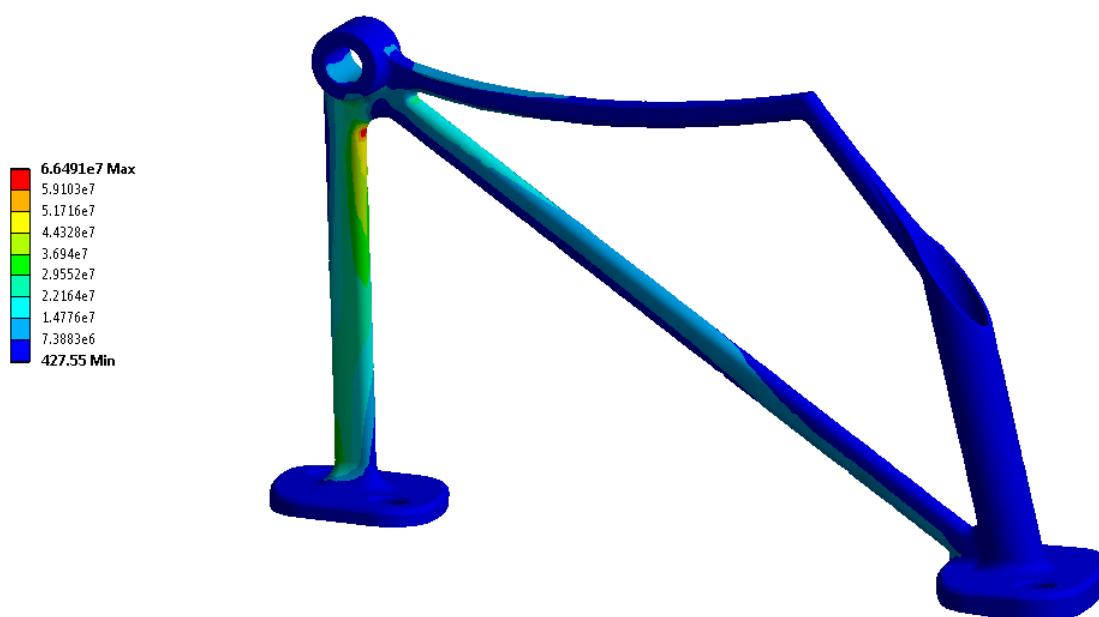
Při samotné simulaci byla automaticky vytvořená výpočetní síť zjemněna v okolí oka pro čep a v také nejvíce namáhaných spojích jednotlivých prutů stojny. Místa ukotvení stojny byla definována jako fixní vazby a v oku působily příslušné zatěžovací síly.

Jelikož by byla stojna vyrobena z hliníku, který se řadí mezi houževnaté materiály, byla pro určení hodnot redukovaného napětí využita hypotéza HMM. V programu ANSYS je tato hypotéza označována jako Equivalent Stress. Hodnota redukovaného napětí byla pro porovnání vypočtena také pomocí hypotézy τ_{max} , v programu pod názvem Stress Intenzity, která dává obecně konzervativnější hodnoty. Určena byla i velikost deformace namáhané součásti. Vypočtené maximální hodnoty těchto veličin jsou uvedeny v Tab. 21. Pevnostní výpočet byl proveden pro všechny čtyři polohy křídla.

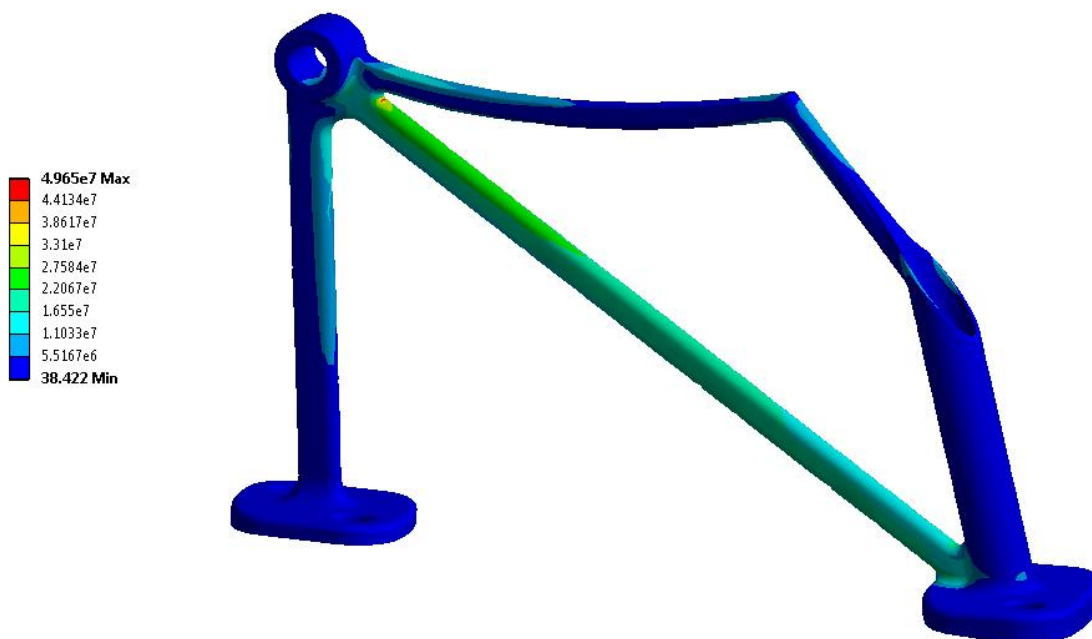
Úhel náběhu	°	0	15	30	45
Maximální hodnota napětí – HMM	MPa	66,49	67,25	47,07	49,65
Maximální hodnota napětí – τ_{max}	MPa	68,58	69,36	50,58	53,36
Maximální hodnota deformace	μm	46,19	50,30	38,68	32,02

Tab. 21 Maximální hodnoty redukovaného napětí a deformace

Na Obr. 121 je graficky zobrazeno rozložení napětí ve stojně při využití hypotézy HMM při nulovém úhlu naklopení křídla. Obr. 122 pak zobrazuje rozložení napětí pro maximální úhel naklopení křídla. Je patrné, že maximální hodnota napětí působí v obou případech jen v malé oblasti součásti. Horní prut kopírující profil křídla nepřenáší téměř žádné zatížení a z pevnostního hlediska zde vůbec být nemusí. Tento prut ovšem vymezuje polohu křídla při nulovém úhlu naklopení. Stejně tak nemá na rozložení zatížení podíl dutý sloupek vystupující ze zadního uchycení stojny. Tento prvek slouží pouze pro ochranu tělesa ovládacího kabelu.



Obr. 121 Rozložení napětí ve stojně při nulovém úhlu naklopení křídla



Obr. 122 Rozložení napětí ve stojně při maximálním úhlu naklopení křídla

Stojna by měla být vyrobena ze slitiny hliníku pomocí odlévání. Byla zvolena slitina hliníku a křemíku s označením EN AC-44400, která je vhodná k odlévání a běžně se využívá v automobilovém průmyslu. Minimální smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ tohoto materiálu je rovna hodnotě 90 MPa. Maximální hodnoty napětí ve stojně je dosaženo při naklopení křídla o 15 stupňů. Dle hypotézy τ_{max} je tato maximální hodnota rovna 69,36 MPa. Z těchto údajů byl určen koeficient bezpečnosti [63]:

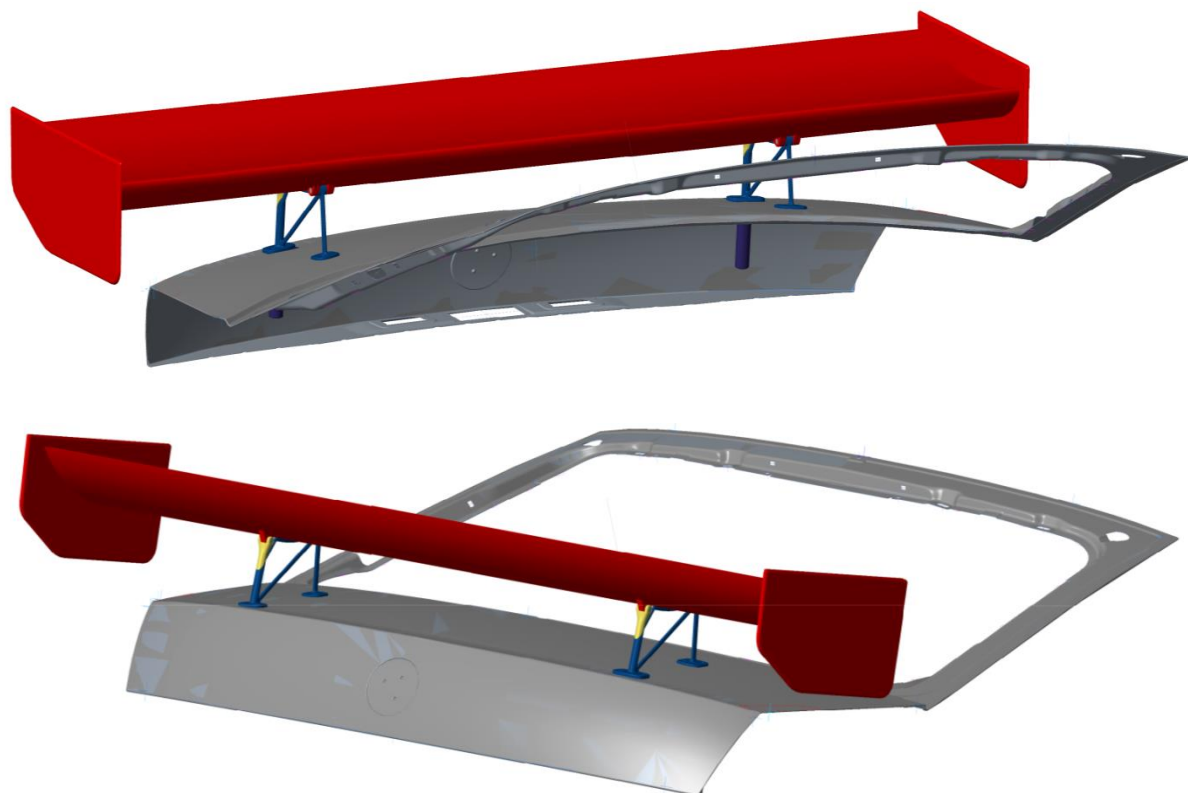
$$k = \frac{90}{69,36} \doteq 1,30.$$

Hodnota koeficientu bezpečnosti je adekvátní požadavkům. Jelikož se nejedná o součást automobilu, která má vliv na bezpečnost, může být koeficient nízký, což umožňuje vytvořit stojnu o nízké hmotnosti.

5.7 SESTAVA AKTIVNÍHO KŘÍDLA

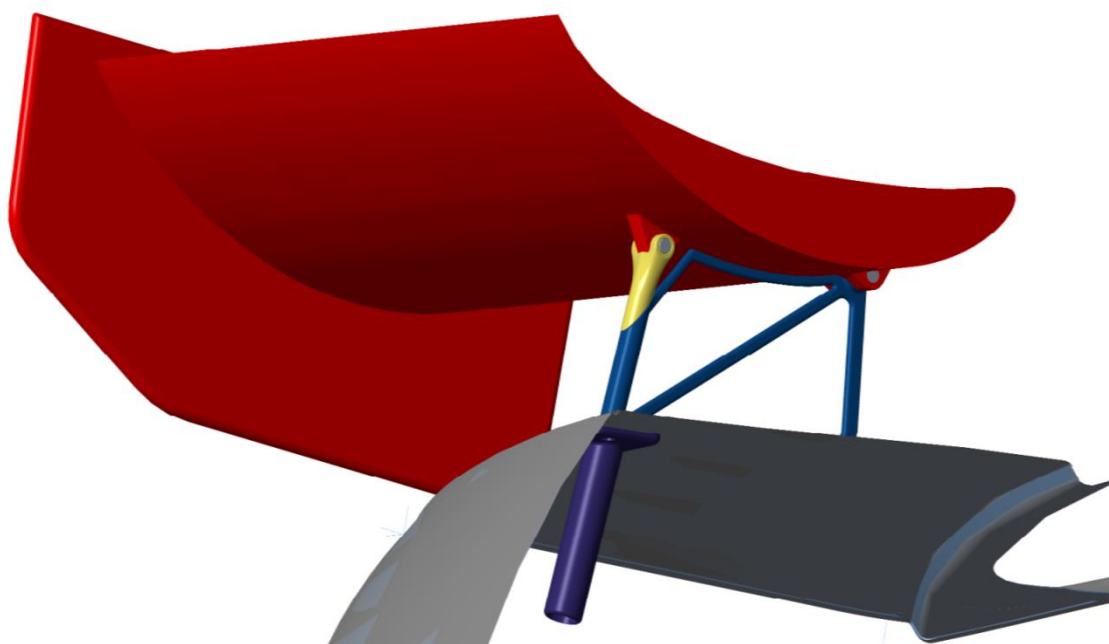
Přední pohled na celou sestavu aktivně regulovatelného křídla je zobrazen na Obr. 123 nahoře. Šedá součást představuje víko zavazadlového prostoru. Tmavě modrá objímka zasahující do vnitřního prostoru zavazadelníku slouží pro upevnění tělesa push-pull kabelu.

Na tomtéž obrázku dole je zobrazen zadní pohled na celou sestavu. Žlutě označená součást slouží pro propojení ovládacího kabelu s křídlem prostřednictvím čepu. Propojovací součást doléhá při nulovém úhlu naklopení na dutý sloupek, v němž je ukryto těleso ovládacího kabelu. Pracovní konec kabelu je zašroubován do závitu, který je vytvořen v propojovací součásti.



Obr. 123 Sestava aktivního křídla

Na Obr. 124 je pak zobrazen detail propojení křídla s ovládacím mechanismem a samotnou stojnou. Objímka pro upevnění ovládacího kabelu je připevněna na víku zavazadlového prostoru prostřednictvím otvorů, které kopírují upevňovací otvory ve stojně. Obě součásti tak budou upevněny k víku pomocí dvou společných šroubů. Vzájemná poloha těchto součástí tak bude přesně vymezena.



Obr. 124 Detail propojení součástí sestavy

5.8 AKTIVNÍ REGULACE

Aktivní regulace by měla křídlo udržovat ve dvou polohách naklopení, a to v závislosti na režimu jízdy. Stejně jako v případě aktivního kanálu by mělo být křídlo ovládáno na základě informací přicházejících ze sběrnice CAN.

Při přímé jízdě bez brzdění je hlavním požadavkem, aby křídlo generovalo co nejmenší celkový aerodynamický odpor automobilu. Dle vypočtených hodnot by tak měl být úhel náběhu v tomto režimu jízdy nulový. Při přímé jízdě nevzniká požadavek na generování přítláčné síly na zadní nápravě, protože u karosérie typu sedan nebude nárůst vztlačové síly na zadní nápravě s rychlostí tak razantní, jako například u vozů se svažitou zádí. Díky přednímu náhonu je nebezpečí ztráty stability na zadní nápravě minimální. Navíc u Octavie osazené křídlem působí na zadní nápravu záporná hodnota vztlaku za všech okolností, na rozdíl od sériového modelu, který nevykazuje známky nestability při přímé jízdě maximální rychlostí. Stav nulového úhlu náběhu by měl být výchozím stavem.

Hlavní význam má aktivně ovládané aerodynamické křídlo při brzdění. Při tomto režimu se křídlo vyklopí tak, aby vytvářelo co největší aerodynamický odpor. Bude tak pracovat jako aerodynamická brzda, jejíž hlavní přínosy byly popsány v kapitole 1.5.2. Úhel náběhu je v tomto režimu roven 45 stupňům. Při větších úhlech náběhu by sice křídlo generovalo ještě větší odpor, ovšem mechanismu ovládání křídla by byl již velmi složitě realizovatelný. Působící síly by byly velké a stejně tak i dráha, kterou by musel mechanismus urazit při naklápění křídla. Režim brzdění bude aktivován dle hodnoty přetlaku v brzdovém systému vozidla.

Přítláčná síla generovaná křídlem na zadní nápravě pomáhá zlepšit stabilitu jízdy při zatáčení ve vysokých rychlostech. Tato síla dosahuje vysokých hodnot již při nulovém úhlu náběhu křídla. Ovšem v případě potřeby by bylo možné řídit naklápění křídla a tím i velikost této síly na základě velikosti bočního zrychlení vozu při zatáčení.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na aktivní aerodynamické prvky osobních vozidel, které umožňují měnit aerodynamické parametry vozu v závislosti na režimu jízdy.

Cílem práce bylo vytvořit a otestovat prototyp aktivního aerodynamického kanálu, který bude přivádět chladící vzduch k brzdám přední nápravy. Dalším cílem bylo vytvořit konstrukční návrh aktivního aerodynamického zadního spojleru. Tyto prvky jsou určeny pro automobil Škoda Octavia třetí generace, který je dostupný v laboratořích Ústavu automobilního a dopravního inženýrství VUT v Brně. Jako podklad pro samotný konstrukční návrh těchto prvků sloužily CAD modely a další nezbytné informace poskytnuté společností Škoda Auto a.s.

Navržený aktivní kanál pro chlazení předních brzd je automaticky uzavírán a otevírán pomocí pohyblivé klapky. Pokud automobil právě nevyužívá brzdy, je kanál uzavřen, což má za následek snížení aerodynamického odporu vozidla. Při zahájení brzdění se kanál otevírá a vzduch proudící přes kanál ochlazuje brzdy předních kol. Snahou bylo, aby navržený kanál ochlazoval brzdy více než kanál, kterým je vybaven sériový model Octavie.

Konstrukční návrh prototypového kanálu byl vytvořen na základě CAD modelu přední části vozu Octavia. Poloha a tvar kanálu byly voleny jednak s ohledem na maximální efektivitu přívodu vzduchu k brzdě, ale také byl kladen důraz na to, aby kanál co nejméně zasahoval do ostatních částí automobilu, což značně usnadnilo následnou montáž kanálu na automobil. Vstup do kanálu byl situován v místě mlhového světloometu. Prototyp kanálu byl vytvořen pouze pro levou část automobilu. Při měření vlivu kanálu na teplotu brzd tak mohl být porovnán jeho přínos oproti kanálu sériovému, který byl ponechán na pravé straně vozu.

Kanál je uzavírán pomocí mechanismu s posuvnou klapkou, jejíž pohyb je vyvozován elektromotorem prostřednictvím ozubeného kola a hřebenu. Pohyb klapky je řízen prostřednictvím vytvořené řídicí elektroniky na základě informací o přetlaku v brzdovém systému a také dle rychlosti jízdy vozidla. Tyto informace jsou získávány ze sběrnice CAN. Navržený řídicí software a hardware využívá platformu Arduino.

Řídicí algoritmus vydává povel k otevření kanálu, pokud překročí přetlak v brzdovém systému hodnotu šesti barů. V tomto stavu setrvává, dokud přetlak opět neklesne pod tři bary. Kanál není uzavřen okamžitě, ale až po minutové prodlevě, která představuje čas určený pro dochlazení brzd. Ovládání klapky je realizováno změnou směru otáčení elektromotoru a krajní polohy jsou detekovány pomocí potenciometru. Samotná aktivní regulace začíná pracovat, až když rychlost jízdy překročí padesát kilometrů v hodině.

Sestava kanálu byla vyrobena pomocí 3D tisku. Při montáži kanálu na automobil byly poupraveny pouze skryté části předního nárazníku a část podběhu. Samotný vzhled automobilu nebyl narušen. Po dokončení montáže byl odladěn řídicí software, aby bezchybně komunikoval s automobilem.

Cílem následného experimentu bylo určit vliv prototypového kanálu na chlazení brzd ve srovnání s kanálem sériovým. Před samotným měřením byl automobil osazen příslušnými senzory. Teplota obou předních brzd byla měřena v šesti různých bodech.

Výsledky experimentu ukázaly, že při využití prototypového kanálu se brzda ochladila ve všech měřených bodech nejméně o 9 stupňů Celsia. Rozdíl teplot brzdového třmenu při využití sériového a prototypového kanálu byl největší na konci části měření, která představovala dochlazování brzd. Nejvíce se třmen ochladil v přední části a to až o 35 stupňů Celsia, což odpovídá poklesu teploty o čtyřicet procent. Ochlazení třmene napomáhá odvádět teplo z brzdových destiček, ke kterým se chladicí vzduch dostává hůře. Hodnota ochlazení brzdového kotouče značně kolísala v závislosti na rychlosti jízdy. Největší rozdíl teplot byl na kotouči naměřen před zahájením brzdění, kdy teplota klesla až o pět procent v porovnání se sériovým kanálem.

Z naměřených hodnot vyplývá, že prototypový kanál nezanedbatelně snižuje teplotu brzdy ve srovnání s kanálem sériovým. Tím přispívá ke zvýšení bezpečnosti provozu, jelikož při zahřívání brzdy klesá její brzdný účinek. Vliv kanálu se projevil i při samotném experimentu, kdy při odstavení automobilu po ukončení měření došlo k přehřátí pravé brzdy, která byla ochlazována sériovým kanálem.

Hodnotu, o kterou se sníží aerodynamický koeficient odporu vozidla při uzavření kanálu, nebylo možno naměřit. Pokles bude relativně malý a při dojezdovém testu by se neprojevil. Tuto hodnotu by bylo možno naměřit pouze v aerodynamickém tunelu. Koeficient odporu se sníží zejména díky menšímu množství vzduchu, které proudí do podběhu a interaguje s koly. Lze předpokládat, že se koeficient sníží v řádu setin. I takovýto relativně malý pokles součinitele odporu má ve vysokých rychlostech prokazatelný vliv na spotřebu paliva a tím i na množství vznikajících emisí. Při otevřeném kanálu naopak aerodynamický odpor mírně vzroste, jelikož je do podběhu přiváděno více vzduchu.

Hlavním přínosem tohoto aktivního prvku je tedy zefektivnění chlazení brzd a snížení aerodynamického odporu automobilu ve vyšších rychlostech. Aktivní brzdový kanál tak napomáhá zvýšit bezpečnost provozu prostřednictvím zvýšení brzdného účinku brzd a při jízdě mimo město snižuje spotřebu paliva, čímž redukuje množství vznikajících emisí.

Dalším cílem této diplomové práce bylo vytvořit konstrukční návrh aero-aktivní regulace přítlaku na zadní nápravě vozidla neboli aktivního zadního spojleru.

Zadní spojler byl vytvořen jako automobilové křídlo. Křídlo využívá profil Benzing 153-175, který je určen pro aplikace v motorsportu. Aktivní regulace křídla spočívá v jeho naklápění, což má za následek změnu aerodynamických parametrů jak samotného křídla, tak celého automobilu.

Snahou je, aby křídlo v režimu přímé jízdy generovalo minimální aerodynamický odpor a při brzdění bylo naklopeno, aby vytvářelo odpor maximální. Křídlo tak bude pracovat jako aerodynamická brzda.

Po vytvoření CAD modelu křídla byl tento model předán k provedení CFD výpočtu aerodynamických parametrů jak samotného křídla, tak parametrů vozu Octavia osazeného tímto křídlem.

Z výsledků simulace vyplývá, že křídlo generuje minimální odpor, když je úhel náběhu roven nule. Maximální odpor vzniká při maximálním úhlu naklopení křídla, který je roven 45 stupňům. Součinitel odporu automobilu s křídlem narostl oproti průměrné hodnotě sériového vozu bez křídla o 19 procent na hodnotu 0,350. Tento nárůst je očekávatelný,

Jelikož křídlo ovlivňuje proudění vzduchu v úplavu za vozidlem, kde vzniká velká část aerodynamického odporu. Při maximálním naklopení křídla dosahuje koeficient hodnoty 0,498, což odpovídá nárůstu o 42 procent oproti křídlu sklopenému. Koeficient generovaného vztaku na zadní nápravě automobilu je pro tyto dva úhly naklopení roven hodnotě -0,388 a -0,485. Na rozdíl od sériového modelu vozidla tak působí na zadní kola záporná vztaková síla.

Hodnoty zatížení působícího na křídlo, které byly získány z CFD výpočtu, byly přepočteny pro maximální rychlost vozidla. Dle těchto hodnot byl navržen model stojny. Pevnost stojny byla ověřena pomocí pevnostního výpočtu. Dále byly vypočteny síly, které působí na ovládací mechanismus a byl navržen samotný mechanismus ovládání křídla. Pro naklápění křídla jsou využity dva push-pull kabely, které se dokáží vysouvat a přenášet požadované zatížení.

Nakonec byla navržena funkce aktivní regulace křídla. Při regulaci by měly být opět využity informace o přetlaku v brzdovém systému přicházející po sběrnici CAN.

Pokud automobil nevyužívá brzdy, je křídlo sklopeno, úhel náběhu je nulový a aerodynamický odpor automobilu dosahuje nejmenší hodnoty. V případě brzdění přechází křídlo do režimu aerodynamické brzdy a vyklopí se o 45 stupňů. Odpor vozu naroste. Jelikož se aerodynamická odporová síla nepřenáší na vozovku, lze dosáhnout vyšší brzdné síly, než kterou jsou schopny přenést pneumatiky vozu. Hodnota zpomalení tak může být větší, než je součin koeficientu tření a tíhy vozidla, tzn. vyšší než 1g.

Brzdná síla na zadních kolech je u sériových vozů omezována, aby nedošlo k jejich blokaci. Při využití křídla naroste přitlačná síla na zadní nápravě. Na zadních kolech je tak možno brzdit větší silou bez rizika blokace, což vede ke snížení brzdné dráhy vozidla.

Aktivní aerodynamické křídlo tedy generuje větší celkový odpor při přímé jízdě, ale také zvyšuje přitlačnou sílu na zadní nápravě a tím zvyšuje jízdní stabilitu. V případě brzdění křídlo zkracuje brzdnou dráhu automobilu a přispívá k větší bezpečnosti provozu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] OBIDI, T. Yomi. *Theory and applications of aerodynamics for ground vehicles*. ISBN 978-0-7680-2111-0.
- [2] KOVANDA, Bohuslav a Jan KOVANDA. *Aerodynamika vozidel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01942-X.
- [3] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. London: Butterworths, 1987. ISBN 04-080-1422-9.
- [4] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 08-376-0142-8.
- [5] ŠILAR, Josef. *Zařízení pro měření proudění vzduchu pod vozidlem*. [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103565. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Jan Vančura, Ph.D.
- [6] PRACHAŘ, Roman. *Jízdní odpory vozidel*. [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33556. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Tomáš Rochla.
- [7] NOVOTNÝ, Pavel. *Základy popisu mazání: Počítačové simulace v automobilovém průmyslu II*. Brno, 2016. Prezentace. VUT FSI Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [8] ALEXANDERSSON, Roger, Malin ALRIKSSON, Roger BRORSSON, Sören ERLANDSSON a Matthias SVÄRD. *Safety aspects on the aerodynamics of Porsche 911* [online]. Chalmers University of Technology, 2002 [cit. 2017-04-26].
- [9] *Ferrari 458 Speciale: The super GT with Telemetry app* [online]. 2014 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.autoconnesse.it/auto-connesse/ferrari-458-speciale-super-gt-telemetry-app/>
- [10] 458 Speciale detail. *GOLD & BLACK'S EGLOOS* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://goldnblack.egloos.com/1212395>
- [11] GRIFFITH, Rod, Thomas MUSCOLO, Alexander ORSI a Glenn TRAINER. *Vehicle Front-End Active Aerodynamics* [online]. 2010 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: http://www.mie.neu.edu/sites/default/files/pdfs/mie/Capstone/Mechanical_Engineering/ME%202010%2004%20Vehicle%20Front-End%20Active%20Aerodynamics.pdf
- [12] NASA Splitter. *Miata Turbo* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://www.miataturbo.net/attachments/race-prep-75/144379-post-your-diy-aero-pics-80-nascarsplitter_1b90756e3f10a9547ddf05bc592268d43519ab09.jpg?dateline=1436809699

- [13] Flegl, H., *Die Fahrleistungsgrenzen heutiger Rennwagenerläutert am Beispiel des Porsche 917/10 Can Am*. Kolloquium über Industrieaerodynamik, Part 3: Aerodynamik von trassen-fahrzeugen, pp 141-152, Aachen, 1974
- [14] Braess, H.-H., Burst, H., Hannes, R., Hamm, L., *Verbesserung der Fahreigenschaften von Personenkraftwagen durch Verringerung des aerodynamischen Auftriebs*. ATZ, Vol. 77, 1975, pp 119-124.
- [15] Assmann, W., Witte, L., *Einfluss der Aerodynamik auf das Fahrverhalten eines PKW*. Vehicle Aerodynamics Symposium, Wolfsburg, December 1982
- [16] JANÁČKOVÁ, Dagmar. *Procesní Inženýrství: Tabulky* [online]. [cit. 2017-03-31].
- [17] Porsche Classic. *Porsche* [online]. Porsche Cars North America, 2017 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.porsche.com/usa/accessoriesandservices/classic/>
- [18] *Porsche* [online]. 2017 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://files1.porsche.com/filestore/image/multimedia/none/rd-2014-porscheclassic-models-roadvehicles-911f-teaser/noral/8144464a-f0f0-11e5-84b6-0019999cd470/porsche-normal.jpg>
- [19] *Porsche* [online]. 2017 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <https://7fc85b9aba0d39ae6336-874e68dfdfaaab298015047a5fc61dea.ssl.cf1.rackcdn.com/images/cars/unblurred/911-turbo.png>
- [20] *KA-T: Vented hood* [online]. 2006 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://img.photobucket.com/albums/v318/savatoge/auto/caraero.jpg>
- [21] BARNARD, R.H. *Road vehicle aerodynamic design: an introduction*. 3rd ed. St. Albans, Hertfordshire: MechAero Pub, 2009. ISBN 978-095-4073-473.
- [22] Nürburgring was dominated by ALA (Aerodinamica Lamborghini Attiva): Lamborghini. In: *YouTube* [online]. 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=estAUcIoFRw>
- [23] DIXIT, Neha Ravi. *Evaluation of Vehicle Understeer Gradient Definitions* [online]. Ohio, 2009 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=osu1259700998&disposition=inline. Thesis. The Ohio State University. Vedoucí práce Dr. Dennis A. Guenther.
- [24] 2017 FORD GT FIRST RIDE: Make America(n supercars) Great Again. *MotorTrend* [online]. 2017 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.motortrend.com/cars/ford/gt/2017/2017-ford-gt-first-ride/>
- [25] Ford GT Active Rear Spoiler | 2016 NAIAS | Autoblog Short Cuts. *YouTube* [online]. 2016 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=HAsmtsw_sRg
- [26] *Lexus 2012 LFA Owners Manual* [online]. Toyota Motor Corporation, 2010 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://drivers.lexus.com/t3Portal/document/om-s/OM77006U/pdf/OM77006U.pdf>

- [27] The new Panamera Turbo and Panamera 4S in motion. *YouTube* [online]. 2016 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-QfRAwg3gkM>
- [28] VIJAYENTHIRAN, Viknesh. McLaren P1 Supercar: First Specs And Live Photos. In: *Mothor Authority: The Luxury and Performance Leader* [online]. 2012 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: http://www.motorauthority.com/news/1079463_mclaren-p1-supercar-first-specs-and-live-photos
- [29] ALL-NEW GIULIA QUADRIFOGLIO: Proof that Love is Worth the Wait. *ALFA ROMEO* [online]. 2017 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.alfaromeousa.com/cars/alfa-romeo-giulia-quadrifoglio>
- [30] Intelligence in Every Move. In: *Alfa Romeo* [online]. 2017 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <https://www.alfaromeousa.com/cars/alfa-romeo-giulia-quadrifoglio>
- [31] Introducing the Porsche 918 Spyder. *PORSCHE* [online]. 2017 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://press.porsche.com/news/release.php?id=787>
- [32] Porsche Active Aerodynamic (PAA). In: *German Car 4um: Car Enthusiasts News & Forum* [online]. 2014 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.germancarforum.com/threads/porsche-918-spyder.49588/page-22>
- [33] Mercedes-Benz - C112. In: *All Car Index* [online]. 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.allcarindex.com/auto-car-model/Germany-Mercedes-Benz-C112/>
- [34] Bugatti's 268mph Veyron Super Sport: The world's fastest production car. In: *New Atlas* [online]. 2010 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://newatlas.com/bugatti-veyron-super-sport/16311/>
- [35] Mercedes-Benz C-Class. In: *German Car 4um: Car Enthusiasts News & Forum* [online]. 2013 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.germancarforum.com/threads/mercedes-benz-c-class-w205.50002/page-4>
- [36] Active grill block detail. In: *Ecomodder* [online]. 2012 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://ecomodder.com/forum/showthread.php/2013-dodge-ram-1500-up-20-better-mpg-21310.html>
- [37] Pagani Huayra: Active Aerodynamics. In: *YouTube* [online]. 2013 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=T1zXCAPbJYk>
- [38] Dodge Challenger R/T NASCAR Nationwide Series (LC) '2010–12. In: *Encyclopedia of Cars in the Pictures* [online]. 2010 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://en.wheelsage.org/category/nascar/32563/pictures/430539>
- [39] Brake ducting on VW Jetta. In: *My Turbo Diesel: VW - Audi - Porsche TDI and Chevy Cruze diesel forum* [online]. 2014 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.myturbodiesel.com/wiki/brake-faq-mythbusting-why-you-may-not-want-big-brake-upgrade/>
- [40] Mini Cooper. In: *Mini Mania* [online]. 2017 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: http://new.mini-mania.com/images_temp/800600001g2nmX7500b.jpg

- [41] APR Carbon Fiber Brake Cooling Ducts Scion FR-S. In: *Vivid Racing* [online]. 2017 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: https://www.vividracing.com/catalog/images/APR_FRS_BCD_1.jpg
- [42] E36 M ducts. In: *Bimmer Forums: The Ultimate BMW Forum* [online]. 2010 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <https://www.bimmerforums.com/forum/showthread.php?1535090-E36-Brake-duct-backing-plates/page3>
- [43] Cooling duct. In: *Audi Sport: The Original and Still the Best Audi Owners Forum* [online]. 2014 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.audi-sport.net/xf/threads/brake-cooling-ducts.231239/>
- [44] Porsche Active Aerodynamics. In: *Carrers.com* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://carrers.com/wp-content/uploads/2015/12/high_porsche_active_aerodynamics_918_spyder_weissach_2014_porsche_ag-2.jpg
- [45] Wind Tunnel Inner Workings. In: *How Stuff Works: Science* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://s.hswstatic.com/gif/illustration-wind-tunnels-1.gif>
- [46] FKFS - Modernisierung Windkanal. *FKFS - Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart* [online]. 2015 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=igUHA-zIswo>
- [47] Vehicle in aeroacoustics wind tunnel. In: *FKFS* [online]. Stuttgart, 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.fkfs.de/en/automotive-engineering/leistungen/automotive-technology/full-vehicle/>
- [48] Wind tunnel. In: *FKFS* [online]. Stuttgart, 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: http://www.fkfs.de/fileadmin/_migrated/pics/kfz_bild_8-4-1_de_01.jpg
- [49] CAN Specification: Version 2.0. *BOSCH* [online]. Stuttgart, 1991 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: http://www.bosch-semiconductors.de/media/ubk_semiconductors/pdf_1/canliteratur/can2spec.pdf
- [50] *L293x Quadruple Half-H Drivers* [online]. Texas Instruments, 2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf>
- [51] MARQUÉS-BRUNA, Pascual. Engineering the race car wing: application of the vortex panel numerical method. *Sports Engineering*. 2011, 13(4), 195-204. DOI: 10.1007/s12283-011-0064-5. ISSN 1369-7072. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s12283-011-0064-5>
- [52] Stefano D'Aste, Chevrolet RML Cruze TC1, ALL-INKL.COM Münnich Motorsport. In: *Motorsport.com* [online]. 2015 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/wtcc/photo/main-gallery/stefano-d-aste-chevrolet-rml-cruze-tc1-all-inkl-com-munnich-motorsport-13/>
- [53] Mazda 3 World Challenge Race Car. In: *WheelsAge.org* [online]. 2011 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://en.wheelsage.org/mazda/3/44672/pictures/489788/>

- [54] Mazda 6 SKYACTIV D wins in Detroit. In: *Driving Line: MAZDA6 DIESEL RACER PUTS STRANGLEHOLD ON GRAND-AM'S GX CLASS* [online]. 2013 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.drivingline.com/articles/mazda6-diesel-racer-puts-stranglehold-on-grand-ams-gx-class/>
- [55] Mercedes-Benz CLA 45 AMG. In: *Motor1.com: Mercedes-Benz Shows Off CLA 45 AMG in a Handsome Racing Suit* [online]. 2013 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.motor1.com/news/71457/mercedes-benz-shows-off-cla-45-amg-in-a-handsome-racing-suit/>
- [56] Škoda Octavia III RS 329HP. In: *Hot Hatch Shop* [online]. 2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: https://www.hothatchshop.cz/files_web/photogallery/original/1495_B_01.jpg
- [57] WTCC Photos. In: *Nextgen Auto: Motorsport* [online]. 2016 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: http://motorsport.nextgen-auto.com/gallery/pictures/2015/wtcc/wtcc-marrakech/138_medium.jpg
- [58] Mercedes-Benz CLA 45 AMG Racing Series. In: *Auto Journal* [online]. 2013 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: http://www.autojournal.cz/wp-content/uploads/2013/09/4666156851955710462900430_878.jpeg
- [59] TCR: Mazda e Audi Mais Inrressadas Na Categoria. In: *AutoSport: De Motores Percebemos Nos* [online]. 2016 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.autosport.pt/wp-content/uploads/2016/08/2010-tri-point-mazda3-world-challenge-racecar-5.jpg>
- [60] Profili. *Enrico Benzing* [online]. [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.benzing.it/enrico.profilo.htm>
- [61] ŠKODA OCTAVIA [online]. Škoda, 2017 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/SiteCollectionDocuments/skoda-auto/ke-stazeni/octavia-katalog.pdf>
- [62] 6 Series Push-Pull Cable. *Custom Control Cables* [online]. 2017 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://www.cccables.com/Cables/PushPull/6SeriesPP.aspx>
- [63] Metalurgie slitin hliníku. *Strojnické tabulky online: Černoch, Vávra apod nyní přehledně na webu* [online]. Dashöfer Holding, 2014 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.strojnicketabulkyonline.cz/odlevani/metalurgie-slitin-hliniku/>
- [64] Škoda Octavia III: kompletní technické údaje a první videa. *Novinky.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/auto/289729-skoda-octavia-iii-kompletni-technicke-udaje-a-prvni-videa.html>
- [65] RUBBING BRAKE DISC ROTOR THERMOCOUPLE TEMPERATURE SENSOR. *HGSI: The sensor connection* [online]. 2017 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://thesensorconnection.com/brake-sensors/all-brake-sensors/rubbing-brake-disc-thermo-couple-temperature-sensor>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

\vec{V}_A	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Vektor rychlosti vozidla
\vec{V}_W	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Vektor rychlosti větru
\vec{V}	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Vektor rychlosti relativního proudu vzduchu
$\frac{dv_l}{dy}$	$[\text{s}^{-1}]$	Gradient smykové rychlosti
Δp_{dyn}	$[\text{Pa}]$	Dynamický tlak na povrchu karosérie
ΔT	$[\text{°C}]$	Rozdíl teplot levé a pravé brzdy
ΔT_f	$[\text{°C}]$	Rozdíl teplot levé brzdy při porovnání obou typů kanálů
a	$[\text{m}]$	Rozvor náprav
A	-	Bod, ve kterém je spojeno křídlo se stojnou
A_c	$[\text{m}^2]$	Čelní plocha vozu
a_d	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Zpomalení vozidla
AR	$[-]$	Aspect ratio
AR_e	$[-]$	Aspect ratio pro křídlo osazené bočnicemi
a_y	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Boční zrychlení
b	$[\text{m}]$	Rozpětí křídla
B	-	Bod, ve kterém je spojeno křídlo s ovládacím mechanismem
c	$[\text{m}]$	Délka profilu křídla
C_D	$[-]$	Aerodynamický součinitel odporu
C_{Da}	$[-]$	Aerodynamický součinitel odporu profilu křídla
C_{Dp}	$[-]$	Aerodynamický součinitel odporu kol
C_{Dw}	$[-]$	Aerodynamický součinitel odporu křídla
C_{Dw0}	$[-]$	Aerodynamický součinitel třecího odporu křídla
C_{Dwi}	$[-]$	Aerodynamický součinitel indukovaného odporu křídla
C_L	$[-]$	Aerodynamický součinitel vztlaku
C_{La}	$[-]$	Aerodynamický součinitel vztlaku profilu křídla
C_{LaMAX}	$[-]$	Maximální hodnota aerodynamického součinitele vztlaku profilu křídla
C_{LF}	$[-]$	Aerodynamický součinitel vztlaku na přední nápravě
C_{LR}	$[-]$	Aerodynamický součinitel vztlaku na zadní nápravě
C_{Lw}	$[-]$	Aerodynamický součinitel vztlaku křídla
C_{Lwa}	$[-]$	Aerodynamický součinitel vztlaku křídla vznikající vlivem změny úhlu náběžné hrany
C_M	$[-]$	Aerodynamický součinitel klonivého momentu
C_N	$[-]$	Aerodynamický součinitel stáčivého momentu

C_p	[-]	Tlakový koeficient
C_R	[-]	Aerodynamický součinitel klopivého momentu
C_Y	[-]	Aerodynamický součinitel boční síly
C_{aF}	[N·rad ⁻¹]	Směrová tuhost pneumatik přední nápravy
C_{aR}	[N·rad ⁻¹]	Směrová tuhost pneumatik zadní nápravy
D	[N]	Aerodynamický odpor
d	[m]	Průměr kola
D_i	[N]	Aerodynamický odpor indukovaný vztlakem
dv_l	[m·s ⁻¹]	Přírůstek rychlosti mezi dvěma vrstvami
D_w	[N]	Odporová síla působící na křídlo
dy	[m]	Přírůstek vzdálenosti mezi dvěma vrstvami
e_Z	[J·kg ⁻¹]	Měrná ztrátová energie proudění
f	[-]	Součinitel valivého odporu
F_{AX}	[N]	Reakční síla v bodě A ve směru osy x
F_{AZ}	[N]	Reakční síla v bodě A ve směru osy z
F_B	[N]	Celková reakční síla v bodě B
F_{BX}	[N]	Reakční síla v bodě B ve směru osy x
F_{BZ}	[N]	Reakční síla v bodě B ve směru osy z
F_T	[N]	Síla na hnacích kolech
F_{Tmax}	[N]	Maximální síla na hnacích kolech
g	[m·s ⁻²]	Tíhové zrychlení
G	[N]	Tíhová síla křídla
h	[m]	Velikost mezery mezi křídlem a karosérií
h'	[m]	Vzdálenost mezi vrcholem kola a spodní částí prahu
h_e	[m]	Výška bočnic
h_f	[m]	Výšková poloha tekutiny
K	[-]	Understeer gradient
L	[N]	Aerodynamický vztlak
l	[m]	Charakteristický rozměr vozidla
L_c	[m]	Délka vozu
L_F	[N]	Aerodynamická vztlaková síla působící na přední nápravu
L_R	[N]	Aerodynamická vztlaková síla působící na zadní nápravu
l_r	[m]	Vzdálenosti horního okraje zadního skla a koncového okraje víka zavazadlového prostoru
l_t	[m]	Charakteristický rozměr obtékaného tělesa

L_w	[N]	Vztlková síla působící na křídlo
M	[N·m]	Klonivý moment
m_v	[kg]	Hmotnost vozidla
M_w	[N·m]	Klonivý moment působící na křídlo
N	[N·m]	Stáčivý moment
O_ϕ	[N]	Valivý odpor
p	[Pa]	Tlak vzduchu
p_∞	[Pa]	Tlak neovlivněného proudu vzduchu
P_D	[W]	Ztrátový výkon způsobený aerodynamickým odporem
p_f	[Pa]	Tlak tekutiny
p_k	[Pa]	Tlak na povrchu zkoumaného objektu
P_M	[W]	Výkon motoru
$p_{m=0}$	-	Okamžik ukončení fáze dochlazování
$p_{m>0}$	-	Počátek brzdění vozidla
P_O	[W]	Ztrátový výkon způsobený valivým odporem
r	[mm]	Vzdálenost bodů A a B v ose x
R	[N·m]	Klopivý moment
r_A	[mm]	Vzdálenost těžiště křídla od bodu A v ose x
r_B	[mm]	Vzdálenost těžiště křídla od bodu B v ose x
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
r_p	[m]	Poloměr kola
s	[m]	Rozchod nápravy
S_1	-	Počátek oblasti odtržení proudu vzduchu od pneumatiky
S_2	-	Konec oblasti odtržení proudu vzduchu od pneumatiky
s_p	[l·(100·km) ⁻¹]	Spotřeba paliva
S_w	[m ²]	Plocha křídla
T	-	Bod na obvodu pneumatiky, v němž je rychlost proudícího vzduchu dvakrát větší než rychlost samotného vozidla
t	[s]	Čas
t_B	[°C]	Teplota brzd
t_p	[m]	Tloušťka profilu křídla v jeho nejširším místě
V	[m·s ⁻¹]	Rychlost relativního proudu vzduchu
v	[km·h ⁻¹]	Rychlost jízdy vozidla
\dot{V}	[dm ³ ·s ⁻¹]	Objemový průtok vzduchu
v_∞	[m·s ⁻¹]	Rychlost neovlivněného proudu vzduchu

V_A	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost vozidla
v_{AT}	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost proudění vzduchu okolo povrchu karosérie
v_f	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost proudění tekutiny
v_{fw}	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost proudění vzduchu na povrchu křídla
v_{krit}	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Kritická rychlost vozidla
$v_{m=0}$	-	Zastavení vozu
$v_{m=90}$	-	Okamžik, kdy rychlost vozidla po zahájení brzdění klesla na hodnotu $90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
v_{max}	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Maximální rychlost vozidla
V_W	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost větru
W_F	$[\text{N}]$	Zatížení na přední nápravě bez vlivu vztlačové síly
W_R	$[\text{N}]$	Zatížení na zadní nápravě bez vlivu vztlačové síly
xy	-	Rovina procházející osami x a y
xz	-	Rovina procházející osami x a z
Y	$[\text{N}]$	Aerodynamická boční síla
α	$[-]$	Úhel náběhu
α_{Lo}	$[-]$	Vliv prohnutí křídla
β	$[-]$	Úhel vybočení relativního proudu vzduchu
β_T	$[-]$	Úhel mezi rovinou střechy vozu a okrajem víka zavazadlového prostoru
γ	$[-]$	Úhel sklonu spojnice bodů A a B vůči ose x
ε	$[-]$	Úhel odklonění vztlačové síly od svislé osy vozu
η	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	Dynamická viskozita
η_m	$[-]$	Mechanická účinnost
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota vzduchu
ρ_f	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota tekutiny
ν	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	Kinematická viskozita
Φ	$[-]$	Úhel přechodu mezi střechou a zadním oknem
φ	$[-]$	Sklon zadního okna
τ	$[\text{Pa}]$	Smykové napětí
τ_V	$[-]$	Úhel svírající vektor rychlosti větru a vozidla

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – kód řídicího algoritmu